

Prise en compte du confort des usagers dans les projets de réhabilitation

Zineb JKAOUA*¹², Alain SEMPEY¹, Aline BARLET¹, Eric LARREY², Hélène DESBIEYS², Denis BRUNEAU¹

¹Université de Bordeaux, I2M, UMR 5295, CNRS,
Bâtiment A11, 351 cours de la libération – 33405 Talence

²Verdi ingénierie

13 Rue Archimède – 33700 Mérignac

*(zineb.jkaoua@u-bordeaux.fr)

Résumé - La conception des projets d'aménagement urbain et de réhabilitation des bâtiments est porteuse de nombreux enjeux et notamment celui d'une meilleure prise en compte des usagers. Afin de définir ces projets en regard de leurs futur ou actuel environnement climatique et usages, il devient nécessaire d'élaborer des méthodes qui centrent l'approche sur l'humain. La méthodologie adoptée pour cette étude expérimentale est basée sur des campagnes de mesures physiques sur site et des questionnaires adressés aux usagers, dans le but de comprendre les éléments qui influent sur le confort thermique perçu en milieu urbain. Cet article propose des stratégies permettant de caractériser ce confort thermique perçu, en quantifiant celui-ci à l'aide de la mise en place d'un indicateur de confort perçu, et construit à l'aide de questionnaires.

MOTS-CLÉS : confort thermique en milieu urbain – usagers – méthode participative - méthode d'évaluation – indices de confort thermiques

Nomenclature

Lettres latines et grecques

C	Coefficient de correction
HR	Humidité Relative, %
Icl	Isolation par les vêtements, clo
M	Satisfaction moyenne
Mt	Métabolisme, met
Ta	Température de l'air, °C
Tmrt	Température radiante moyenne, °C
V	Vitesse de l'air, m.s ⁻¹

Indices et exposants

i	items
n	nombre d'item

Abréviations

APCI	Average Perceived Comfort Index
HI	Heat Index
Humidex	Humidity index
ICU	Ilot de Chaleur Urbain
PET	Physiological Equivalent Temperature
PMV	Predicted Average Mean Vote
UTCI	Universal Thermal Climate Index

1. Introduction

Les observations du microclimat ont démontré une multiplication des épisodes de fortes chaleurs au cours des dernières années. Cette transformation du climat est accompagnée par l'apparition de températures plus élevées dans les centres urbains denses, liées notamment à l'intensification de l'urbanisation, par rapport à celles mesurées dans les campagnes environnantes. Il s'agit du principe d'îlot de chaleur urbain (ICU). Ces phénomènes physiques mettent à l'épreuve le confort dans les espaces extérieurs ainsi que dans les bâtiments en période estivale. Aujourd'hui, il apparaît donc nécessaire d'adopter des stratégies et des actions de lutte contre ces ICU, et ainsi de concevoir ou de rénover des espaces urbains de façon appropriée et adaptée aux microclimats actuels mais aussi à ceux auxquels ils seront confrontés dans le futur.

Les espaces extérieurs jouent un très grand rôle dans la qualité de vie. Les pratiques au sein de ceux-ci dépendent entre autres des propriétés physiques microclimatiques qui peuvent augmenter, limiter ou modifier leurs usages. Ainsi, mener des projets d'aménagement et de réhabilitation urbains et architecturaux nécessite une attention toute particulière aux qualités environnementales prouvées, viables et désirables lors de l'élaboration des projets. En particulier, afin de profiter amplement des espaces extérieurs pour toutes les activités quotidiennes, il est important d'avoir une réflexion globale afin de créer des ambiances microclimatiques confortables pour les différents usagers.

Avec la problématique grandissante du phénomène d'ICU, la nécessité du retour d'expérience de la part des usagers à l'échelle urbaine se fait de plus en plus ressentir [1]. Ce travail va permettre d'étudier le confort thermique en milieu urbain et de mettre en évidence la nécessité pour les concepteurs et les collectivités d'avoir à disposition une méthodologie participative et des indicateurs leur permettant de pouvoir évaluer le niveau de confort thermique atteint dans les espaces extérieurs. A travers l'étude présentée ici, nous avons cherché à répondre aux questions suivantes : ▪ Comment caractériser et évaluer le confort microclimatique en extérieur, à l'échelle du quartier ? ▪ Quel(s) indicateur(s) choisir dans les différentes phases d'un projet pour bien représenter le confort de l'individu ?

Pour répondre à ces questions, une méthode expérimentale a été développée sur la base d'un état de l'art portant sur les différents indices. Notre étude vise à quantifier le confort thermique en extérieur. Pour cela, nous avons souhaité expérimenter une méthodologie intégrant des enquêtes standardisées permettant le calcul d'un indice de confort perçu et la corrélation de cet indice avec des mesures microclimatiques relevant de l'ingénierie appliquée.

2. L'évaluation du confort microclimatique en extérieur

A l'opposé des études du confort hygrothermique en intérieur qui sont déjà nombreuses et pour lesquelles des normes existent et de nombreux indices ont été éprouvés, les études du confort microclimatique en milieu urbain sont relativement récentes [1] [2]. L'environnement extérieur est ouvert, incontrôlable et synonyme de grandes variations des sollicitations thermiques influençant le confort de l'individu, tant sur le plan temporel, au rythme des journées et des saisons, que sur le plan spatial, selon les matérialités et l'agencement des espaces concernés. Il est le théâtre de phénomènes physiques complexes relatifs à l'interaction entre l'atmosphère, le rayonnement solaire et la ville. En regard de la complexité des ambiances microclimatiques urbaines, nous choisissons ici d'aborder celles-ci au prisme de l'analyse de l'influence des paramètres microclimatiques dans l'environnement proche de l'utilisateur sur le confort de celui-ci.

De nombreux indices ont été développés afin de quantifier le niveau de confort des individus dans les espaces et de se rapprocher au mieux du ressenti. Le tableau 1 contient les indices étudiés dans ce travail de recherche. Ils associent les conditions microclimatiques locales (les paramètres) et la sensation thermique humaine. Ils sont de différents types, avec tout d'abord les indices simples empiriques, prenant en compte uniquement des paramètres climatiques. Par exemple, l'Humidex et le HI intègrent l'effet combiné de la température de l'air et de l'humidité. Ensuite, les indices rationnels principalement le PMV, l'UTCI et le PET sont basés sur le calcul du bilan thermique du corps humain à partir de modèles physiques et physiologiques, intégrant en plus des paramètres climatiques des variables personnelles telles que le niveau d'activité et l'isolation par les vêtements. Une majorité de ces indices permettent au final d'estimer une température dite « équivalente », en fonction des différents paramètres pris en compte. Seuls le PMV et l'APCI sont sans dimension.

Indices thermiques	Type d'indice (Unité)	Nature du modèle	Paramètres	Type d'échelle thermique associée	Echelle
Humidex [3]	Température équivalente (°C)	Empirique	Ta, HR	Stress thermique	20 à >46
HI [3]	Température équivalente (°C)	Rationnel	Ta, HR	Stress thermique	27 à >54
PMV [3] [4]	Vote de sensation thermique (Sans dimension)	Rationnel	Ta, HR, V, Tmrt, M, Icl	Sensation thermique	-3 à 3
UTCI [5]	Température équivalente (°C)	Rationnel	Ta, HR, V, Tmrt, M, Icl	Stress thermique	<-40 à >46
PET [3]	Température équivalente (°C)	Rationnel	Ta, HR, V, Tmrt, M, Icl	Sensation thermique	<4 à >41
APCI [6]	(Sans dimension)	Empirique	items	Catégorie de confort	0 à 6

Tableau 1 : Synthèse des caractéristiques des différents indices de confort urbain étudiés

L'APCI (Average Perceived Comfort Index) est un indice subjectif basé sur des données perceptives relevées à l'aide de questionnaires. Les évaluations des différents paramètres microclimatiques sont moyennées et pondérées en fonction de l'importance accordée à chacun de ces paramètres par les personnes interrogées pour leur confort. Il s'agit donc dans un premier temps du questionnaire d'identifier la définition du confort microclimatique pour le contexte étudié pour chaque enquêté. Cette définition est exprimée en termes de coefficients de correction C_i , comme le montre l'équation (1). Ceux-ci sont définis en classant les différents paramètres, selon leur importance pour le confort, sur une échelle de 1 « Pas du tout important » à 5 « Tout à fait important ». Dans un second temps, le questionnaire permet d'identifier les sensations immédiates par rapport aux mêmes paramètres microclimatiques introduits dans la première partie du questionnaire. Il s'agit d'évaluer la satisfaction moyenne de l'échantillon représentatif des enquêtés au sujet de l'item i (correspondant aux différents paramètres) [6].

$$APCI = \frac{\sum_{i=1}^n (\bar{M}_i - 1)}{\sum_{i=1}^n C_i} \quad (1)$$

n : nombre d'items ; i =item (température de l'air, humidité, vitesse de d'air...)

C_i : Coefficient de correction

\bar{M}_i : Satisfaction moyenne pour l'ensemble de l'échantillon de sujet concernant l'item (ou paramètres) i selon l'échelle suivante : $M=1$ « Tout à fait satisfaisant » jusqu'à $M=7$ « Pas du tout satisfaisant »

Echelle APCI	Catégorie du confort
[5,16 ; 6]	Tout à fait inconfortable
[4,30 ; 5,15]	Très inconfortable
[3,44 ; 4,29]	Inconfortable
[2,58 ; 3,43]	Ni confortable, ni inconfortable
[1,72 ; 2,57]	Confortable
[0,86 ; 1,71]	Très confortable
[0 ; 0,85]	Tout à fait confortable

Figure 1 : Echelle d'évaluation de l'APCI

Le site répond aux attentes des usagers en matière de confort lorsque le résultat de l'indice est proche de 0 (situation idéale), l'indice étant obligatoirement compris entre 0 et 6, puisqu'il est bâti sur une échelle d'évaluation de satisfaction en 7 points dans le questionnaire établi. En se basant sur la valeur de l'indice, les différents espaces peuvent être classés selon un niveau de confort perçu allant de « Tout à fait confortable » à « Tout à fait inconfortable ».

3. Méthodologie

Les outils permettant d'évaluer le confort microclimatique s'avèrent compliqués et loin d'être à la portée des concepteurs de la ville. L'objectif est d'expérimenter une méthodologie pratique récente mais peu utilisée dans le but de la valider. La démarche empirique dans cette étude consiste à mettre en parallèle les indices thermiques existants avec un indice subjectif. Elle est basée sur une expérimentation combinée qui regroupe deux approches complémentaires simultanément.

D'abord, l'approche objective, qui repose sur les mesures in-situ pour l'obtention de données liées aux paramètres physiques dans les différents sites, vise à comparer les valeurs des indices dans différentes situations climatiques et configurations urbaines.

Ensuite, afin d'évaluer la perception microclimatique en intégrant les points de vue psychologiques des usagers, l'approche subjective permet de quantifier le degré de satisfaction et les attentes des individus. Elle se base sur des techniques impliquant l'utilisateur de l'espace dans l'investigation empirique, à travers des enquêtes par questionnaire et en déterminant l'APCI.

3.1. Mesures micro-météorologiques

Les paramètres climatiques donnés par les stations météorologiques ne permettent pas de caractériser les conditions thermiques réelles à l'échelle d'un microclimat urbain spécifique et selon la morphologie, les matériaux et les activités. La collecte des données microclimatiques en milieu urbain nécessite, donc, une étude locale. Pour notre étude, nous avons défini un protocole de mesures basé sur le relevé des données microclimatiques agissant sur le confort des usagers au plus proche des espaces pratiqués par ceux-ci.

Les mesures ont été réalisées grâce à une station microclimatique mobile de type mini station DELTA OHM HD32.3TC. Cette station mobile, montée sur un trépied permet une mesure de température opérative de type Pt100 « globe noir », une mesure d'humidité relative à l'aide d'un capteur capacitif, une mesure de la température de l'air de type Pt100, ainsi qu'une mesure de vitesse d'air de type NTC 10K Ω « anémomètre à fil chaud ». Elle est positionnée à proximité des enquêtés. Les grandeurs mesurées par cette mini station suffisent aux calculs des valeurs des indices thermophysiques suivants : UTCI, PMV et PPD, HI, PET. Cet instrument fournit ces valeurs automatiquement. Les paramètres personnels tels que l'isolation par les vêtements et le niveau d'activité métabolique ont été pris en compte dans le mât de mesures, et ont été définis selon la norme ASHRAE 55 [7] et la norme ISO 7730 [8].

3.2. Collecte de données perceptives liées aux paramètres environnementaux

Quant à l'évaluation du confort perçu, le questionnaire a été préparé pour identifier les paramètres microclimatiques les plus importants qui influent sur le bien-être de chaque personne et ainsi donner une définition du confort selon les usagers de l'espace étudié. La satisfaction immédiate à l'égard de chacun de ces paramètres est également évaluée à l'aide d'une échelle en sept points. Les données ainsi recueillies permettent alors le calcul de l'APCI.

3.3. Présentation des cas d'études

Les mesures des conditions microclimatiques ainsi que les enquêtes ont été réalisées simultanément sur plusieurs périodes de l'année (cf. Tableau 2). Nous présenterons ci-dessous à titre d'exemple les résultats de deux jours d'enquête effectués au mois de juillet 2021 sur le site de l'I2M au sein de l'Université de Bordeaux (cf. Figure 3).

Site	Vichy	ENSAM Talence	I2M Talence	IUT Bordeaux	ENSAP Bordeaux
Saison	Eté	Printemps	Eté	Automne	Automne
Echantillon	50	14	10	18	10

Tableau 2 : Synthèse des expérimentations effectuées

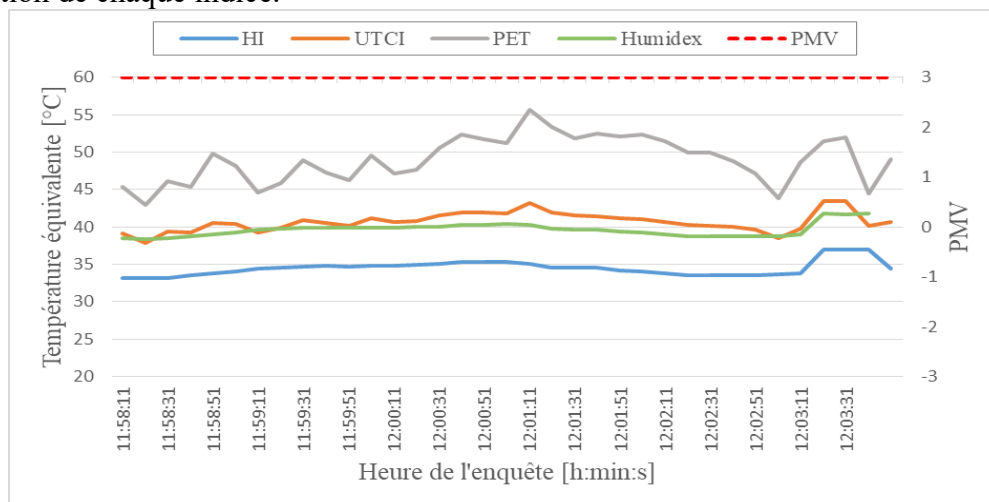


Figure 2 : Photos du lieu de l'expérimentation à l'I2M (a) 21 juillet 2021 (b) 23 juillet 2021

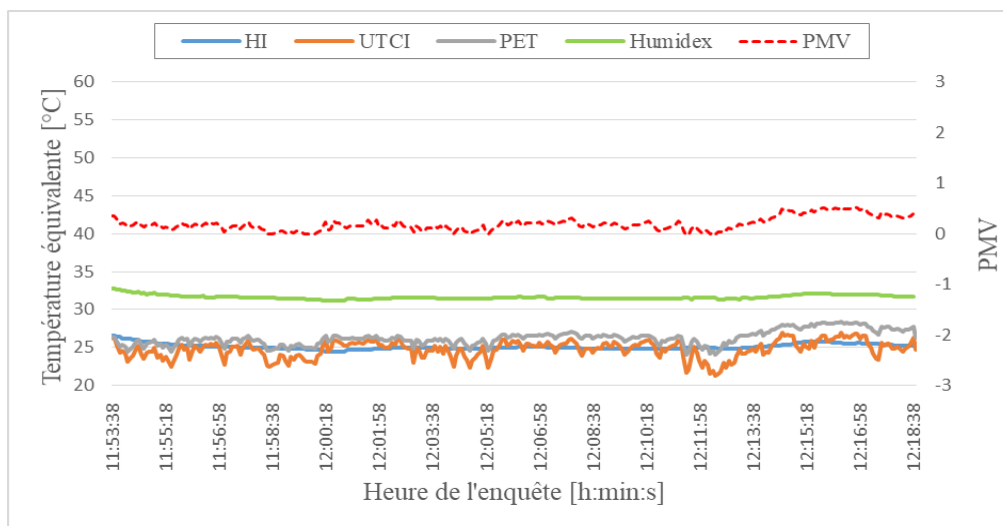
4. Analyse et discussion des résultats

4.1. Approche objective

Dans cette recherche, la concordance et la comparaison entre les résultats des indices ont été étudiées à l'aide de données physiques issues de capteurs. Pour une analyse détaillée, deux jours d'expérimentation, le 21 et 23 juillet 2021, représentant les conditions météorologiques d'été, ont été sélectionnés. Les graphiques ci-dessous (Figure 3) permettent d'observer l'évolution de chaque indice.



(a)



(b)

Figure 3 : Évolution temporelle des indices (UTCI, Humidex, PMV, HI, PET) : (a) le 21 juillet 2021 avec $T_a=32,5^{\circ}\text{C}$, $RH=47\%$, $v=1\text{ m/s}$, $T_{mrt}=69,3^{\circ}\text{C}$, (b) le 23 juillet 2021 avec $T_a=24,4^{\circ}\text{C}$, $RH=75\%$, $v=1,2\text{ m/s}$, $T_{mrt}=28,6^{\circ}\text{C}$

Le 21 juillet, le temps était ensoleillé (T_{mrt} moyenne de $69,3^{\circ}\text{C}$) et calme ($v=0,1$ à 2 m/s). Pour le 23 juillet, le temps était nuageux (T_{mrt} moyenne de $28,6^{\circ}\text{C}$) et peu venteux ($v=1$ à $2,6\text{ m/s}$). Par temps frais et nuageux, le cours temporel des indices a dévié de façon significative (cf. Figure 3). Les indices dérivés du bilan thermique du corps humain (PET, UTCI) ont une allure presque similaire. Les indices simples (HI, Humidex) sont bien corrélés, ils ont la même allure mais avec un certain décalage. Ce dernier est sensiblement le même pour les deux jours. On remarque que l'Humidex est plus sensible à l'humidité relative que le HI. Pendant les journées ensoleillées, les indices basés sur des formules relativement simples n'illustrent pas assez l'impact du rayonnement solaire. L'une des causes possibles est l'absence de facteur de rayonnement dans les équations. Cependant, ces variables sont bien représentées dans les indices de bilan thermique avec des niveaux de sensation et de stress thermique élevés (cf. Tableau 3).

A partir des données, on peut déduire que des indices particuliers n'expriment raisonnablement les conditions bioclimatiques que dans des situations spécifiques. Comme on remarque d'après la Figure 3-a, l'indice de confort PMV atteint rapidement son seuil max 3, ceci montre que son résultat n'est pas précis et son application et sa mise en œuvre est très limitée en extérieur pour un climat chaud. Bien que ce résultat soit numériquement correct, l'échelle de sensation thermique n'est pas adaptée pour les conditions extérieures. L'indice est principalement utilisé dans les environnements intérieurs et son calcul repose sur un modèle stationnaire. De ce fait, il est souhaitable d'utiliser des indices qui décrivent d'une manière réaliste l'aspect du confort thermique de l'individu dans les espaces extérieurs.

Indices	Echelle de sensation / stress thermique	
	21 juillet 2021	23 juillet 2021
PMV	Très chaud	Neutre
Humidex	Un certain inconfort	Un certain inconfort
UTCI	Très grand stress thermique	Pas de stress thermique
HI	Attention extrême : des crampes de chaleur et un épuisement par la chaleur sont possibles	Hors échelle
PET	Très chaud	Légèrement chaud

Tableau 3 : Echelle thermique associée à chaque indice pour le 21 et le 23 juillet 2021

4.2. Approche subjective

Les études expérimentales in situ apportent des informations cruciales sur le lien entre l'occupant et son environnement. La figure 4 ci-après représente le pourcentage des réponses « Tout à fait important » pour chacun des paramètres microclimatiques proposés et permet ainsi de donner la définition du confort selon les usagers d'I2M.

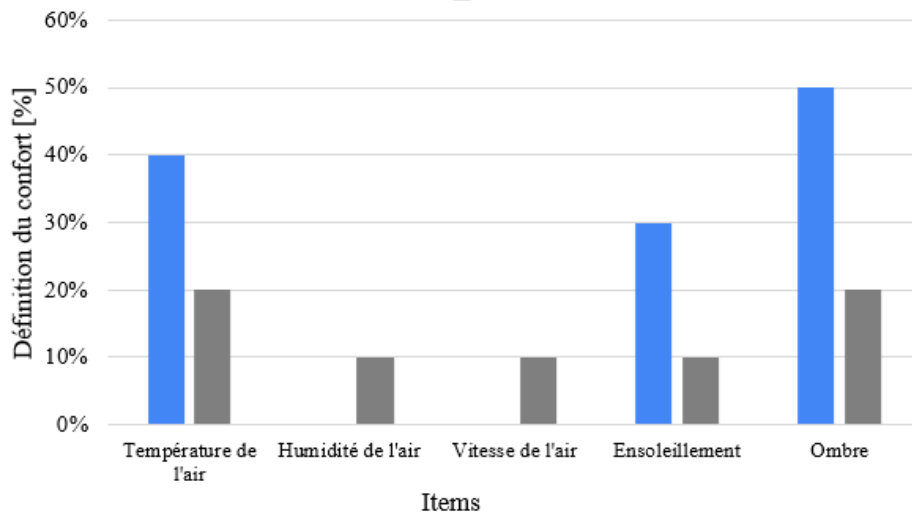


Figure 4 : Taux de réponses « tout à fait important » pour les paramètres microclimatiques (bleu pour le 23 juillet 2021 et le gris pour le 21 juillet 2021)

Les résultats montrent que l'ombre joue un rôle important pour le bien être de près de 50% des individus le 21 juillet car il faisait très chaud. L'importance de la température de l'air est exprimée différemment en fonction des deux jours étudiés avec 40% des enquêtés qui trouvent que la température de l'air est importante le 21 juillet pour leur confort. L'humidité et la vitesse de l'air sont moins importantes pour le bien-être. Les enquêtes montrent que les usagers ont des conditions de confort différentes selon le jour étudié. Malgré le changement des conditions climatiques, l'ombre et la température de l'air sont classés premier. À partir de la définition du confort selon les usagers et de l'évaluation des paramètres in-situ, l'indice moyen de confort perçu (APCI) a été calculé. Le niveau de confort, avec une valeur de 3.31, est perçu « ni confortable ni inconfortable » pour le 23 juillet, marqué par un temps nuageux. Le site était « inconfortable » le 21 juillet, avec un APCI=3.1. Ces résultats permettent de trouver par la suite les solutions et les aménagements qu'il faut prioriser et sur lesquels il faut se concentrer pour établir et améliorer le confort.

4.3. Comparaison des deux approches

D'après la figure 3-a et le tableau 3, le résultat de l'UTCI montre la présence d'un grand stress thermique, le PMV et le PET donnent un niveau de sensation thermique « très chaud ». L'APCI obtenu pour ce cas indique un classement du site dans « inconfortable ». Pour le 23 juillet, l'ensemble des indices (UTCI, PMV, APCI) donnent des résultats similaires. On remarque une cohérence entre ces différents indices.

5. Conclusion et perspectives

En conclusion, les résultats obtenus ont démontré que la méthode, adaptée au contexte d'étude, peut être utilisée pour prendre en compte les conditions du confort microclimatique.

La méthodologie, sur laquelle repose l'approche, repositionne l'humain au centre des préoccupations en objectivant leurs perceptions grâce à des paramètres utilisables par les acteurs de la conception. Son emploi peut augmenter le coût d'un projet. Basés sur les perceptions des usagers, ces résultats définissent, à partir de l'identification des attentes des usagers, la stratégie d'intervention la plus adaptée. L'APCI est adapté aux contextes microclimatiques et socioculturels locaux. La prise en compte des usagers et la mise en place de l'indice APCI en amont d'un projet de réhabilitation permettront de réaliser un diagnostic, un état des lieux et de recenser les besoins. Après les travaux et au cours de l'exploitation, l'indice jouera un rôle important afin d'étudier l'évolution des perceptions des usagers et d'identifier leurs ressentis et mesurer l'impact de la rénovation sur le confort et la satisfaction. L'analyse de la différence entre l'état initial et le projet rénové permet d'évaluer l'impact des modifications sur le bien-être des usagers et donc la potentialité que le projet soit apprécié et que des activités variées s'y développent. L'utilisation de cette méthode peut permettre aux concepteurs et aménageurs des espaces urbains de préconiser aisément les aménagements à l'échelle du quartier selon les besoins des usagers et les conditions de confort thermique. Diverses mesures peuvent être mises en œuvre pour répondre aux besoins des usagers, assurer le confort et créer des îlots de fraîcheur. Quelques méthodes envisageables peuvent être la végétalisation afin de bénéficier du rafraîchissement par l'ombrage ainsi que par l'évapotranspiration, la mise en place des dispositifs favorisant l'évaporation de l'eau (comme les jets d'eau, les brumisateurs), la gestion des eaux de pluie et la perméabilisation des sols. La suite consistera à analyser la sensibilité des indices qui mettra en lumière l'effet de chaque paramètre. La seconde étape (non illustrée ici) de la démarche globale est de quantifier l'impact des aménagements urbains sur le confort à l'intérieur des bâtiments ainsi que sur le besoin énergétique en termes de climatisation.

Références

- [1] Kubilay, A., Strebel, D., Derome, D., Carmeliet, J., (2021), Mitigation measures for urban heat island and their impact on pedestrian thermal comfort. *Journal of Physics: Conference Series*. <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/2069/1/012058>
- [2] Johansson, E., Thorsson, S., Emmanuel, R., Krüger, E., (2014). Instruments and methods in outdoor thermal comfort studies – The need for standardization. *Urban Climate* 10, Part 2, 346–366. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2013.12.002>
- [3] Blazejczyk, K., Epstein, Y., Jendritzky, G., Staiger, H., & Tinz, B. (2012). Comparison of UTCI to selected thermal indices. *International Journal of Biometeorology*, 56(3), 515-535.
- [4] Fanger, P.O., 1970. Thermal comfort. Analysis and applications in environmental engineering. Thermal comfort. Analysis and applications in environmental engineering.
- [5] Bröde, P., Fiala, D., Blazejczyk, K., Holmer, I., Jendritzky, G., Kampmann, B., Tinz, B., Havenith, G., (2011). Deriving the operational procedure for the Universal Thermal Climate Index (UTCI). <https://doi.org/10.1007/s00484-011-0454-1>
- [6] Talhi, A., Barlet, A., Bruneau, D., & Aichour, B. (2020). Towards a prediction of outdoor human thermal comfort adapted for designers of urban spaces: examining UTCI and APCI in the context of Algiers (Algeria). In *International Journal of Biometeorology*, 64(4), 651– 224 662. <https://doi.org/10.1007/s00484-019-01854-3>
- [7] ASHRAE 55, (2017). Standard 55-2017 -- Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy (ANSI/ASHRAE Approved).
- [8] ISO 7730, (2005). Ergonomie des ambiances thermiques -- Détermination analytique et interprétation du confort thermique par le calcul des indices PMV et PPD et par des critères de confort thermique local.