

Vers une méthodologie expérimentale pour l'évaluation du confort thermique extérieur, application au campus de l'ESTP à Cachan.

A. Lapertot^{1*}, V. Basecq¹, A. Dony¹, L. Durivault-Reymond², A Hajjar²

¹ Institut de Recherche, ESTP, 94230 Cachan, France

² CORE Center by COLAS, 78771 Magny les Hameaux, France

*(auteur correspondant : alapertot@estp.fr)

Résumé – Cette étude s'intéresse à la surchauffe urbaine et à son impact sur le confort thermique des usagers dans des espaces urbains ouverts. Dans le cadre du projet de réaménagement du campus de l'ESTP, une méthodologie expérimentale, basée sur des sondages d'une part et sur des mesures microclimatiques expérimentales d'autre part, a été développée pour évaluer le confort thermique des usagers dans les espaces extérieurs. Le dispositif expérimental comprend une station météorologique et une station microclimatique extérieure, déployées dans la zone d'étude. Cette évaluation repose sur des données expérimentales collectées au sein du campus ESTP Cachan et elle vise à quantifier le confort thermique extérieur en comparant deux indices de confort thermique, l'*UTCI* et le *PET*. Les premiers résultats ont montré que les enquêtes réalisées en avril 2023 ont permis de mettre en avant les profils et les ressentis des participants. De plus, les mesures expérimentales recueillies en juillet 2022 ont révélé que les valeurs de l'*UTCI* et du *PET* ont dépassé les 41 °C pendant la journée la plus chaude, ce qui constitue un inconfort thermique élevé pour les individus. Une discussion a permis de mettre en avant l'influence du rayonnement solaire et de la vitesse du vent sur ces indicateurs du confort thermique.

Nomenclature

HR humidité relative, %

CLO isolation thermique des vêtements, *clo*

MET activité métabolique, *met*

T température, °C

v vitesse, *m/s*

Indices et exposants

mr moyenne radiante

g globe

Abréviations

PET Physiologically Equivalent Temperature (°C)

UTCI Universal Thermal Climate Index (°C)

1. Introduction

Les phénomènes d'îlots de chaleur urbains et de surchauffe urbaine sont des problèmes croissants dans les environnements urbains [1]. Les îlots de chaleur surviennent lorsque les zones urbaines accumulent et retiennent davantage la chaleur par des surfaces telles que les éléments de voiries en béton, ou matériaux bitumineux et les bâtiments. La surchauffe urbaine, problème complexe souvent induit par les îlots de chaleur, se traduit par des conditions thermiques inconfortables pour les résidents urbains [2]. Étant donné ces effets néfastes, il est essentiel d'évaluer l'inconfort thermique des usagers afin de développer des solutions visant à atténuer ces impacts thermiques.

Le confort peut être défini comme un état de bien-être physique, psychologique et social, durant lequel une personne se sent à l'aise et en harmonie avec son environnement. Il englobe différents aspects, notamment le confort thermique, acoustique, visuel, qualité de l'air [3]. Certaines études se concentrent spécifiquement sur l'évaluation du confort thermique extérieur [4], qui correspond à la sensation de confort associée aux variations climatiques perçues dans

un espace donné dues à la température, à l'humidité, au mouvement de l'air et à l'irradiation solaire.

L'objectif de cette étude, réalisée sur le campus ESTP de Cachan, consiste d'abord à mettre en place une méthodologie pour évaluer le confort thermique à partir de deux sources de données : - données expérimentales mesurées in situ et - données collectées de l'avis subjectif des usagers sur le confort thermique extérieur. Les mesures permettent la détermination des indices *UTCI* et *PET* [5] et l'usage de leurs échelles respectives en termes de stress thermique. Ainsi la comparaison de l'information de ces deux indices sera mise en évidence. Enfin un travail de comparaison des deux indices est proposé, afin de mettre en évidence leur sensibilité aux conditions physiques mesurées.

Cette étude présente tout d'abord le contexte et la méthodologie expérimentale pour quantifier le confort thermique extérieur. Le cas d'étude, les enquêtes et le dispositif expérimental sont présentés dans la partie 3. Ensuite, les résultats et une discussion seront également apportées pour observer l'influence de l'irradiation solaire et de la vitesse du vent, dans la partie 4. Cette étude constitue le démarrage d'un projet de caractérisation des îlots de chaleur par expérimentation, sondage, sur le campus de l'ESTP de Cachan.

2. Contexte

Dans le cadre du projet de réaménagement de l'ESTP, le campus de Cachan se positionne comme un exemple de quartier urbain engagé dans la transformation en un vaste laboratoire naturel, avec pour objectif de lutter contre les impacts des surchauffes urbaines. Le but du projet est de développer un démonstrateur en proposant des solutions innovantes pour améliorer le confort thermique des usagers. Identifier l'état de l'existant avant modification est une étape préalable indispensable.



Figure 1 : Emprise du démonstrateur à l'ESTP, campus de Cachan.

La figure 1 illustre la zone d'intérêt d'une superficie de 3500 mètres carrés, présentant une problématique de surchauffe urbaine locale bien identifiée. Cette zone se caractérise par une grande surface ensoleillée, avec au centre un mobilier urbain d'ombrage mal adapté (béton et toit métallique). Elle servira à étudier et à tester des infrastructures végétales et hydrauliques, dans le but d'explorer, de concevoir et de tester des solutions pour la gestion des eaux pluviales et l'optimisation de l'évapotranspiration. De plus, elle visera à renforcer la continuité des cadres écologiques au bénéfice des écosystèmes végétaux et animaux, tout en développant de nouveaux usages pour les utilisateurs du campus, notamment les étudiants et le personnel.

3. Description de la méthodologie

La méthodologie est basée sur plusieurs méthodes complémentaires déployées en amont du projet (caractérisations de l'existant) et sera poursuivie tout le long du projet (caractérisations des différents aménagements). Dans cet article nous nous concentrons sur les points suivants, étape initiale de l'exploitation expérimental du site en tant que cas d'étude :

- Observations du site pour identifier des considérations microclimatiques
- Choix de l'emplacement du portique microclimatique C1 à partir des caractérisations radiatives des matériaux existants des différentes surfaces (murs, sols) ;
- Réalisations de campagnes de mesures des différents paramètres météorologiques permettant de calculer les indices du confort thermique, idéalement pendant des vagues de chaleur en période estivale ;
- Mise en œuvre d'enquêtes et d'observations auprès des usages sur les mêmes périodes de réalisations de campagne de mesures microclimatiques.



Figure 2 : Image du cas d'étude sur Google Earth. Les points bleu, jaune et vert correspondent à la position de la station microclimatique C1 pour les semaines S1, S2, S3. Le point rouge est corrélé à la position de la station météorologiques (SM).

La figure 2 présente le cas d'étude localisé dans le campus de l'ESTP (Cachan, France). La zone est constituée de trois bâtiments (Galilée, Vauban, Recherche) et un espace de repos avec une protection solaire métallique entouré en partie de buissons. Concernant le type de sol, la zone est composée de revêtements bitumineux de couleur rouge pour les accès aux bâtiments, des dalles claires au centre, et de la pelouse devant le bâtiment Vauban.

3.1. Enquêtes des usagers

Les enquêtes des usagers nécessitent un questionnaire exhaustif pour évaluer le confort thermique extérieur [5]. Le questionnaire réalisé tient compte de divers aspects, tels que les sensations thermiques perçues, les activités extérieures habituelles, les préférences en matière de vêtements, les comportements d'adaptation au climat, et les évaluations subjectives des sensations thermiques perçues en tenant compte de l'histoire thermique des usagers. Des échelles de notation ont été utilisées pour évaluer le niveau de confort thermique, tandis que des questions ouvertes ont permis aux participants d'exprimer leurs opinions.

3.2. Présentation des dispositifs et du protocole expérimental

La figure 3 présente une image de la zone d'étude pendant l'évaluation microclimatique expérimentale réalisée. Le dispositif expérimental comprend une station météorologique située en toiture ainsi qu'une station microclimatique extérieure mobile, cette dernière a été déplacée à différents emplacements dans la zone d'expérimentation. Le choix de ces emplacements a été basé sur des considérations microclimatiques (surfaces ensoleillées), les flux de passage et les activités des usagers, ainsi que sur les variations de revêtements de voiries et d'expositions par rapport aux bâtiments et mobiliers environnants.



Figure 3 : Image de la zone d'étude (à gauche) et de la station microclimatique de Colas (à droite).

Le tableau 1 montre que la station microclimatique permet de mesurer la température de l'air, l'humidité relative, la température du globe noir, le rayonnement et la vitesse du vent. Toutes ces grandeurs présentent des plages d'utilisation et une incertitude de mesure. Les données sont recueillies avec un pas de temps d'acquisition d'une minute.

Tableau 1 : Caractéristiques des capteurs du fabricant Campbell Scientific qui équipent la station microclimatique de Colas. Les capteurs sont fixés à une hauteur de 1m10.

Paramètre	Température et humidité relative de l'air	Rayonnement	Vitesse du vent	Température globe noire
Capteurs	Thermohygromètre (HYGROVUE5) sous abri à ventilation naturelle (RAD 06)	Pyranomètre à thermopile numérique (CS320) – gamme 385 nm à 2105 nm	Anémomètre (03002) à 3 coupelles et girouette	Sonde thermistance dans un globe noir (fabricant Sytec)
Range	-40 ; 70 °C 0 ; 100 %	0 ; 2000 W/m ²	0.5 ; 60 m/s	-5 ; 95 °C
Incertitude	±0.3 °C ±3.8 %	±5 %	±0.5 m/s	±0.7 °C

Les mesures à l'aide de la station microclimatique ont été réalisées sur une période de trois semaines, du 4 au 22 juillet 2022, pendant une période de fortes chaleurs. Chaque jour, la station était déployée vers 8h et retirée vers 19h pour des raisons logistiques du matériel. L'ESTP dispose également d'une station météorologique qui mesure toute l'année la température, l'humidité relative de l'air, le rayonnement, ainsi que la vitesse et la direction du vent. L'ensemble des données recueillies ont un pas de temps des mesures de 15 minutes.

3.3. Paramètres d'entrée pour l'évaluation du confort thermique

Autre que la température de l'air, l'humidité relative et la vitesse du vent, il est essentiel de prendre en compte la température moyenne radiante, l'activité métabolique ainsi que l'isolation

thermique des vêtements pour évaluer le confort thermique. La température moyenne radiante est liée aux températures des surfaces environnantes qui émettent et absorbent des rayonnements thermiques. La norme ISO 7726 fournit des lignes directrices pour l'évaluation de la température moyenne radiante T_{mr} à partir de la température du globe noire T_g et la température de l'air T_{air}

$$T_{mr} = \left[(T_g + 273.15)^4 + 0.4 * 10^8 * |T_g - T_{air}|^{\frac{1}{4}} * (T_g - T_{air}) \right]^{\frac{1}{4}} - 273.15 \quad (1)$$

L'activité métabolique, qui se réfère à la production de chaleur par le corps humain pendant diverses activités, est un facteur physiologique important pour évaluer le confort thermique. La norme ISO 7730 fournit des directives pour mesurer et prendre en compte cette activité, en considérant les taux métaboliques standard associés à différentes tâches.

L'isolation des vêtements, qui représente leur capacité à retenir la chaleur corporelle et à protéger contre les conditions extérieures, est un autre facteur physiologique important pour évaluer le confort thermique. Schiavon et Lee [6] ont établi une relation pour évaluer différentes isolations vestimentaires en fonction de la température extérieure.

3.4. Evaluation du confort thermique extérieur

Cette étude se focalise sur l'évaluation du confort thermique en extérieur en utilisant deux indicateurs : l'indice universel du climat thermique et la température physiologiquement équivalente. Ces grandeurs sont des paramètres couramment utilisés pour évaluer le ressenti thermique des individus dans des environnements extérieurs.

L'*UTCI* (Universal Thermal Climate Index) [7] est un indicateur qui évalue la sensation thermique d'une personne dans des milieux extérieurs en prenant en compte divers paramètres environnementaux tels que la température de l'air, la vitesse du vent, l'humidité, et le rayonnement solaire. Jendritzky et al. [8] ont montré que ce critère peut être utilisé dans tout type de climat, pour toute saison de l'année. Il permet d'évaluer une température ressentie :

$$UTCI = T_{air} + f_1(T_{air}, T_{mr}, v_{air}, HR_{air}) \quad (2)$$

Le *PET* (Physiologically Equivalent Temperature) [9] est un indice qui évalue la sensation thermique dans des environnements extérieurs. Elle présente l'avantage de fournir une évaluation plus détaillée et précise du ressenti thermique, car elle est basée sur le modèle MEMI (Munich Energy-Balance Model for Individuals) qui définit le principe d'équilibre thermique du corps humain en combinant des paramètres climatiques et thermo-physiologiques (habillement I_{cl} et activités humaines M). Le modèle MEMI, détaillé dans [5], permet de quantifier la température perçue par le corps humain, la température de surface des vêtements et surtout la température physiologique équivalente :

$$PET = f_2(T_{air}, T_{mr}, v_{air}, HR_{air}, M, I_{cl}) \quad (3)$$

Ces deux indices présentent une grande différence dans la prise en compte de l'habillement et de l'activité physique. En effet, pour le calcul du *PET*, ces valeurs sont des variables au modèle numérique alors que pour le calcul de l'*UTCI*, ces données sont fixées à l'aide d'un modèle vestimentaire propre [10]. Les auteurs le justifient par l'incertitude comportementale associée et de valeur d'activité moyenne, il est normalement nécessaire de déporter l'indice si l'activité change, ou les vêtements ne sont pas adaptés. En outre, les travaux de Grosdemouge [4] ont présenté les différentes gammes de valeurs et les interprétations physiques des deux

indicateurs. Enfin, ces indicateurs sont calculés à partir d'une moyenne glissante de 30 minutes pour tenir compte de l'adaptation thermique entre le corps et son environnement.

4. Premiers résultats et discussions

Une première campagne expérimentale a été réalisée pour établir l'état de référence avant le réaménagement du campus. Dans ce contexte, un projet d'étudiants mené à l'ESTP s'est concentré sur l'évaluation de l'inconfort thermique en exploitant les données expérimentales collectées en juillet 2022 et en réalisant des enquêtes auprès des usagers en avril 2023.

4.1. Résultats des mesures expérimentales in-situ

L'analyse des données collectées pendant l'été 2022 se concentre sur la journée la plus chaude enregistrée, à savoir celle du 13 juillet 2022 avec l'emplacement du portique microclimatique S2C1 (voir figure 2).

La figure 4 expose les variations des grandeurs mesurées par le portique microclimatique et la station météorologique. Les données expérimentales montrent que la température de l'air (courbe violette) augmente légèrement entre 25 et 35°C pendant la durée d'acquisition, ce qui est en accord avec la mesure de la station météo. De plus, la température du globe noire (courbe verte) est plus élevée que la température de l'air puisqu'elle tient compte du rayonnement solaire, mais aussi des rayonnements diffus et réfléchis provenant des parois des bâtiments environnants. De même, le portique microclimatique enregistre une légère augmentation de 26 à 30 °C de la T_{mr} (courbe bleue) jusqu'à 9h puisque le bâtiment Galilée couvre le rayonnement solaire. Ensuite, cette grandeur subit des fluctuations très importantes, provoquées par des couvertures nuageuses partielles entre 9h et 12h, ce qui est également en accord avec l'irradiation solaire mesurée par la station météorologique variant entre 300 et 600 W/m². T_{mr} augmente légèrement entre 12h et 14h, lorsque le soleil est à son zénith, pour atteindre une valeur d'environ 57 °C à partir de 16h, alors que la station météorologique indique que le rayonnement solaire subit une diminution bien marquée à 16h en passant de 800 à 400 W/m². Une explication possible est la réflexion du flux solaire et la réémission de chaleur provenant des surfaces environnantes.

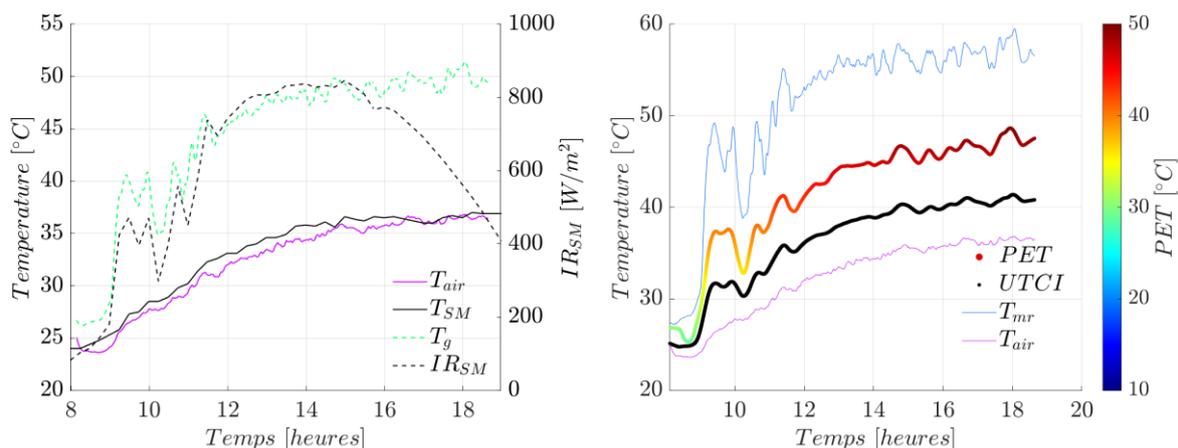


Figure 4 : Evolution des grandeurs mesurées par le portique microclimatique et la station météorologique SM (à gauche). Représentation des indicateurs UTCI et PET (à droite).

La figure 4 à droite montre que les valeurs de l' $UTCI$ commencent à 25 °C le matin, indiquant un stress thermique modéré, puis atteignent plus de 41 °C en pleine journée, signalant un stress thermique très élevé, ce qui peut entraîner un inconfort thermique. Par ailleurs, l'indicateur PET présente une tendance très similaire à l'indicateur $UTCI$. Ses valeurs se situent entre 25 et 30 °C le matin, gamme de températures considérée comme la plage où les individus

peuvent percevoir une sensation légèrement chaude. Le *PET* dépasse les 48 °C l'après-midi, ce qui indique des conditions environnementales très chaudes, exposant les individus à un inconfort thermique élevé. En outre, les indicateurs de confort thermique affichent des valeurs plus élevées lorsque le portique microclimatique est directement exposé aux rayonnements solaires, ce qui est le cas à 9h et 10h15, tandis qu'ils sont légèrement plus faibles lorsque la vitesse du vent est plus élevée, ce qui est le cas à 15h et 17h. En effet, les indicateurs de confort thermique connaissent une augmentation de l'ordre de 7°C lorsque la T_{mr} croît de 20 °C et subissent une baisse d'environ 2°C en raison d'une augmentation de la v_{air} de 0,5 m/s.

4.2. Résultats des enquêtes des usagers

Les étudiants du projet ont réalisé une enquête sur la zone d'expérimentation à l'ESTP. Le portique microclimatique extérieur n'était pas disponible pendant cette période, mais nous avons à disposition les données de la station météo. Le sondage a été effectué le 13 et le 18 avril 2023, et a généré un panel de 97 réponses. Les questionnaires ont été réalisés via l'application Google Form pour faciliter l'extraction des données vers Excel.

Les données ont permis de déterminer le niveau moyen d'activité et d'habillement des participants. Les résultats révèlent que 70 % des usagers étaient debout au moment du sondage et 57 % portaient des vêtements considérés comme moyennement chauds (manches longues, sweat-shirt), tandis que le reste optait pour des vêtements jugés chauds (pull d'hiver, manteau). Les vêtements portés par les usagers sont adaptés à la saison. Ceci corrobore le cadre de détermination de l'UTCI, justifié par Havenith [10] qui soulève la capacité des individus à s'adapter vestimentairement. Toutefois ce point doit faire l'objet d'investigation plus détaillée, dans le cadre de nouveau sondage

Par ailleurs, les résultats de l'enquête ont permis d'évaluer le ressenti des usagers. 56 % des participants ont estimé que leur sensation thermique était neutre et 31 % ont indiqué avoir légèrement chaud. Parallèlement, la station météo a enregistré des températures moyennes de 13.2 °C avec une vitesse de vent de 1 m/s pendant les sondages. Finalement, 80 % des participants ont estimé se sentir confortables ou assez confortables, ce qui est en accord avec les conditions météorologiques enregistrées par la station météo. En effet, l'irradiation solaire moyenne est de 615 W/m² pendant les enquêtes, témoignant ainsi de conditions favorables en termes de température ressentie.

Enfin le site d'étude met en évidence des temps de présence des usagers en extérieur en partie supérieur à 15 minutes. Le site permet exploiter durant la pause de midi, permet de sonder des usagers dont la thermophysologie s'est adapté aux conditions extérieures. Cela permet d'approcher le cadre d'étude expérimental en intérieur, tel qu'évoqué par Zhang [11].

5. Conclusion

Le dispositif expérimental, composé d'une station météorologique et d'un portique microclimatique déplacé dans la zone d'étude, a permis d'évaluer le confort thermique à l'aide de deux indices de confort, l'UTCI et le *PET*, relié au ressenti des occupants exposés aux conditions physiques mesurées. Les enquêtes avec les usagers ont permis de définir le profil et le ressenti des usagers en accord avec les données de la station météorologique. Par ailleurs, les résultats montrent que les indicateurs de confort peuvent dépasser 40 °C dans notre zone expérimentale, créant ainsi des conditions environnementales très chaudes et un inconfort thermique élevé. Ces indicateurs sont plus élevés lorsque les portiques sont directement exposés aux rayons solaires et peuvent être légèrement plus faibles en cas de vitesse du vent plus élevée.

Notre méthodologie d'évaluation expérimentale du confort thermique extérieur a été testée et nécessite un renforcement, notamment dans les mesures de rayonnement, afin d'estimer précisément l'impact des flux réfléchis et émis par les surfaces environnantes. De plus, il serait nécessaire de poursuivre cette étude comparative entre les sondages qualitatifs et les mesures quantitatives sur le site de Cachan avec des mesures simultanées lors d'épisodes de surchauffe urbaine en réalisant un traitement statistique rigoureux des données de sondage. Une autre perspective est de réaliser une étude de modélisation numérique et des outils d'aide à la décision pour évaluer les conditions thermiques dans les espaces urbains. Enfin, cette approche permettra d'explorer différentes stratégies pour atténuer les surchauffes urbaines.

Remerciement

Les auteurs expriment leur gratitude envers les étudiants de l'ESTP ayant suivi le parcours recherche, M. ALKEMA, S. BEN ALI, C. BOURZEIX, N. BOURDEAU, M. BOUTES, A. BRANGER, S. COLINOT, pour leur engagement lors de cette étude. Les auteurs tiennent également à remercier A. KINDINIS et L. ZIYANI pour leur contribution en tant que co-superviseurs du projet d'étudiants.

Références

- [1] CEREMA, 2019. Ilots de chaleur : Agir dans les territoires pour adapter les villes au changement climatique. <https://www.cerema.fr/fr/actualites/ilots-chaleur-agir-territoires-adapter-villes-au-changement>
- [2] ADEME, 2017. Diagnostic surchauffe urbaine : méthodes et applications territoriales. https://www.adaptation-changement-climatique.gouv.fr/sites/cracc/files/fichiers/2018/11/400_Diagnostic%20de%20la%20surchauffe%20urbaine%20-%20M%C3%A9thodes%20et%20applications%20territoriales.pdf
- [3] Yousef Al horr, Mohammed Arif, Martha Katafygiotou, Ahmed Mazroei, Amit Kaushik, Esam Elsarrag, Impact of indoor environmental quality on occupant well-being and comfort: A review of the literature, International Journal of Sustainable Built Environment, 5, 1-11 (2016), <https://doi.org/10.1016/j.ijbsbe.2016.03.006>.
- [4] Wang Y, de Groot R, Bakker F, Wörtche H, Leemans R. Thermal comfort in urban green spaces: a survey on a Dutch university campus. Int J Biometeorol. 2018;62(6):945-954. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00484-016-1193-0>
- [5] Grosdemouge, Virginie, Proposition d'indicateurs de confort thermique et estimation de la température radiante moyenne en milieu urbain tropical. Contribution à la méthode nationale d'évaluation des ÉcoQuartiers, Thèse de doctorat Physique du bâtiment et génie urbain La Réunion 2020, supervisé par Garde, François et David, Mathieu.
- [6] Stefano Schiavon, Kwang Ho Lee, Dynamic predictive clothing insulation models based on outdoor air and indoor operative temperatures, Building and Environment, 59, 250-260 (2013). <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.08.024>.
- [7] Bröde, Peter & Krüger, Eduardo & Rossi, Francine. (2011). Assessment of urban outdoor thermal comfort by the universal thermal climate index UTCI.
- [8] Jendritzky, G., de Dear, R. & Havenith, G. UTCI—Why another thermal index? Int J Biometeorol 56, 421–428 (2012). DOI: <https://doi.org/10.1007/s00484-011-0513-7>
- [9] Höpe P., The physiological equivalent temperature – a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment, Int J Biometeorol (1999) 43:71–75
- [10] Havenith G, Fiala D, Błazejczyk K, Richards M, Bröde P, Holmér I, Rintamaki H, Benshabat Y, Jendritzky G. The UTCI-clothing model. Int J Biometeorol. 2012;56(3):461–70. doi: 10.1007/s00484-011-0451-4.
- [11] Zhang Human thermal sensation and confort in transient and non-uniform thermal environments. Thèse de doctorat. University of California, Berley, 2003.