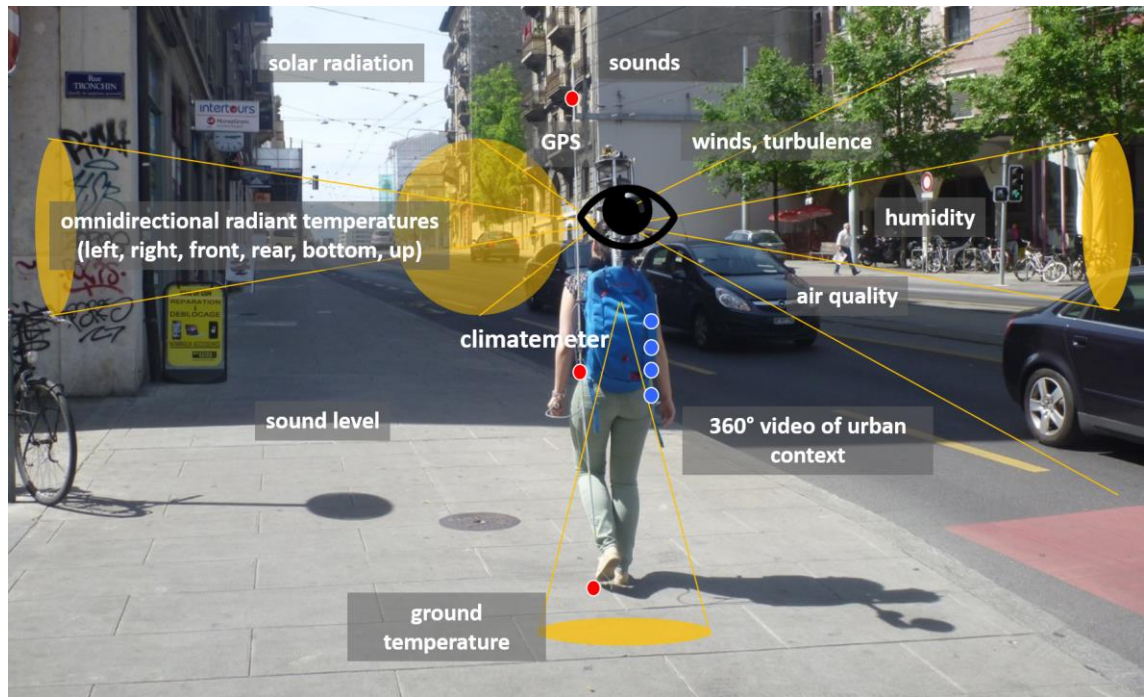


CityFeel - An innovative protocol and instrument to better understand urban microclimate



Reto Camponovo*, Peter Gallinelli, Victor Guillot
Hes-so//Genève - hepia. Energy, Environment, Architecture Group, Institute inPACT
Rue de la Prairie 4, CH-1202 Genève
Contact : Reto Camponovo, reto.camponovo@hesge.ch , <https://leea.hesge.ch>

Zusammenfassung

Résumé

Abstract

La compréhension de l'influence du microclimat urbain sur le ressenti réel des piétons est complexe et nécessite des moyens d'investigation en cohérence avec l'échelle de travail, avec les questions posées et avec des situations urbaines réelles (matérialité, végétation, morphologie, etc.). Cette connaissance, encore incomplète, est pourtant le préalable à tout projet urbanistique qui vise à améliorer le bien-être des citoyens en lien avec le réchauffement des villes. hepia a développé un instrument - le climatmètre – qui permet de mesurer de façon objective et détaillée, la scène climatique ressentie par un sujet lors de déplacements à pied dans les villes. Cette approche, par la mesure de situations réelles, ne nécessite pas d'établir et valider des hypothèses de calcul ; elle permet de concentrer l'effort sur l'interprétation des données et la description des vrais phénomènes en jeu.

The understanding of the influence of the urban microclimate on the real perception of pedestrians is complex and requires means of investigation that are consistent with the working scale, with the asked questions and with real world urban situations (substance, vegetation, morphology, etc.). This knowledge, still incomplete, is nevertheless the prerequisite for any urban project that aims to improve the well-being of urban dwellers in connection with global warming. hepia has developed an instrument - the climatmeter - that makes it possible to measure in an objective and detailed way the climate scene as perceived by a subject while walking in cities. Measuring real situations does not require establishing and validating calculation assumptions; it allows concentrating the effort on the interpretation of the data and the description of the real phenomena at stake.

1. Contexte

Les centres urbains subissent des hausses de température de plus en plus importants en lien avec le réchauffement climatique (multiplication des jours de canicule et des nuits tropicales) mais aussi en raison de leur croissance et densification, avec comme effet une augmentation de leur métabolisme et donc de la chaleur interne. Ces événements contribuent fortement à l'aggravation du phénomène d'îlot de chaleur urbain (ICU).

En même temps il est attendu qu'en 2045, 25% de la population suisse sera composée par des seniors¹, une catégorie de personnes plus vulnérable aux effets du réchauffement des villes au point de limiter leurs sorties pendant les plus belles heures de la journée. Les caractéristiques des rues et places (matérialité, végétation, morphologie, points d'eau) influencent le bien-être du citadin et la praticabilité de certains parcours.

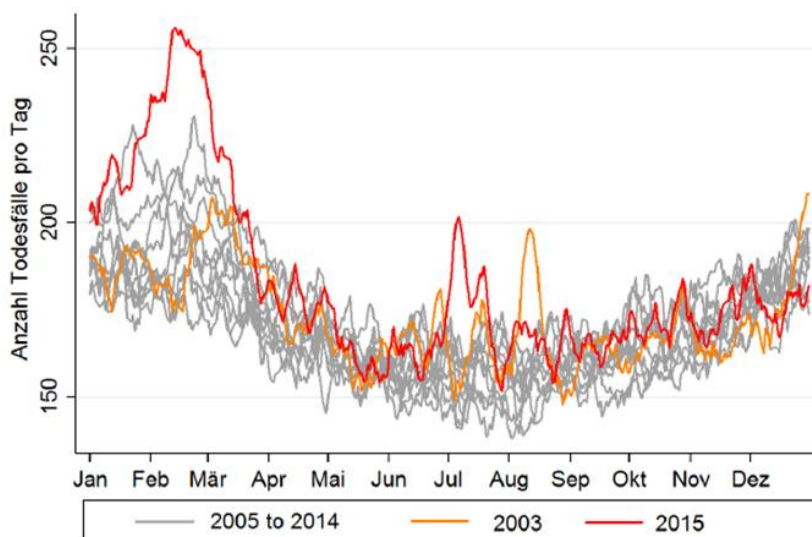


Fig.1 : Excès de décès en Suisse durant les périodes de canicule été 2003 et 2015 (Institut Tropical et de Santé Publique Suisse, 2016)

La nature pâtit aussi du stress consécutif à des *facteurs de forçage microclimatique* tels des contextes urbains minéraux ou la forte réflectivité des surfaces, qui peuvent provoquer des phénomènes néfastes comme la nécrose corticale des troncs d'arbres (échaudure), ou tout simplement nuire à l'épanouissement de la nature en ville.

En particulier les arbres, sur lesquels les politiques misent pour lutter contre les îlots de chaleur, sont eux-mêmes victimes de l'urbanisation et du climat urbain et tout indique que le changement climatique aggravera ces effets: nous sommes confrontés à une véritable *cercle vicieux*, à un *effet d'emballement*.

La prise en compte de ces problèmes est devenue une thématique majeure que les collectivités essaient d'intégrer dans leurs actions. Les villes sont de plus en plus nombreuses à adopter des *plans climat* comme outil stratégique de développement urbain.

L'indisponibilité de connaissances actualisées et localisées fait que trop souvent ces plans se réfèrent à des "solutions" provenant de contextes géographique, topographique, climatiques et urbanistiques sensiblement différents de la situation des villes suisses. Des solutions basées sur des jugements intuitifs ou partiels, sur des recettes de bon sens, risquent de ne pas atteindre les objectifs escomptés en matière de microclimat urbain, du bien-être des habitants et d'épanouissement du végétal, avec le risque de conduire à des investissements échoués.

¹ Office fédéral de la statistique (OFS). Communiqué de presse, 12-5-2016

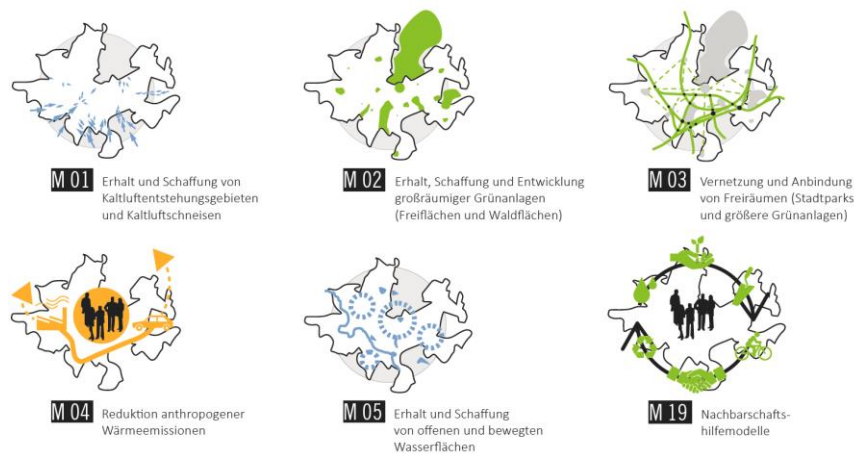


Fig. 2: Exemple de référentiel de politique climatique généraliste : extrait du plan climat de la ville de Karlsruhe (D)

Qu'il s'agisse du citadin ou du végétal, les multiples conditions dans l'environnement urbain proche qui limitent ou renforcent le bien-être du vivant ne sont pas encore suffisamment objectivées et quantifiées. Pour permettre aux autorités et aux aménagistes de réaliser des interventions urbaines durables en mesure d'apporter les services écosystémiques attendus, dont ceux ayant trait au microclimat urbain, il est nécessaire de renforcer les connaissances existantes.

1.1 Etat des lieux

Les contextes urbains sont multiples et les impacts sur les microclimats le sont encore plus. Les études sont aujourd'hui encore trop peu nombreuses pour tirer des conditions générales, pour autant que cela soit possible, ou au contraire pas assez précises pour répondre aux besoins spécifiques d'un projet donné ou à des questions telles que:

- pourquoi l'arbre ne contribue pas toujours au rafraîchissement de la ville ?
- pourquoi les plans d'eau n'apportent que rarement la fraîcheur escomptée ?
- comment s'assurer du bon usage des surfaces urbaines comme composante de la régulation climatique ?
- quelle contribution climatique attendre de la nature en ville ?

La méthodologie d'analyse et les instruments nécessaires doivent être en cohérence avec les questions posées, avec l'échelle de travail (granulométrie) et avec la précision attendue.

En vue d'élucider les mécanismes à l'œuvre, différents outils d'étude émergent, que ce soit la mesure sur le terrain, la télédétection ou la simulation.

La télédétection ne montre que les températures de surface horizontales (obtenues à partir de la luminance énergétique et d'hypothèses d'émissivité) mais pas celle de l'air et encore moins le confort au niveau de la rue (les deux premiers mètres). La résolution est de l'ordre de 30 m et l'applicabilité directe aux aménagements urbains est difficile malgré l'aspect attractif des images.

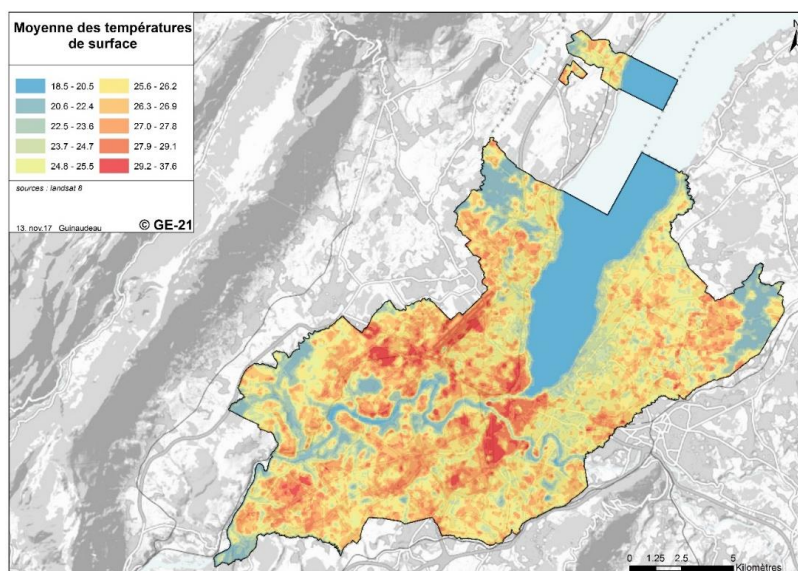


Fig. 3: Exemple de représentations cartographique des températures de surface obtenues par télédétection²

Les logiciels de simulation urbaine ne donnent des résultats acceptables que s'ils représentent fidèlement la réalité urbaine (géométrie, matérialité de chaque élément composant le lieu) et s'ils sont rigoureusement calibrés à l'aide de mesures de terrain fiables (longue durée, maillage dense, hauteurs du sol représentatives). Ils nécessitent de nombreuses hypothèses et des définitions aux conditions limite ainsi que d'un modèle numérique 3D de la ville. Bien que les images produites soient séduisantes, ces modèles dégagent au mieux des tendances et se heurtent souvent au manque de résolution qui est de l'ordre de 10 - 20 m (des résolutions plus fines nécessitent une description géométrique et physique pour l'instant difficilement envisageable). Aucune de ces deux approches permet d'identifier des phénomènes tels les brises urbaines et leurs effets localisés.

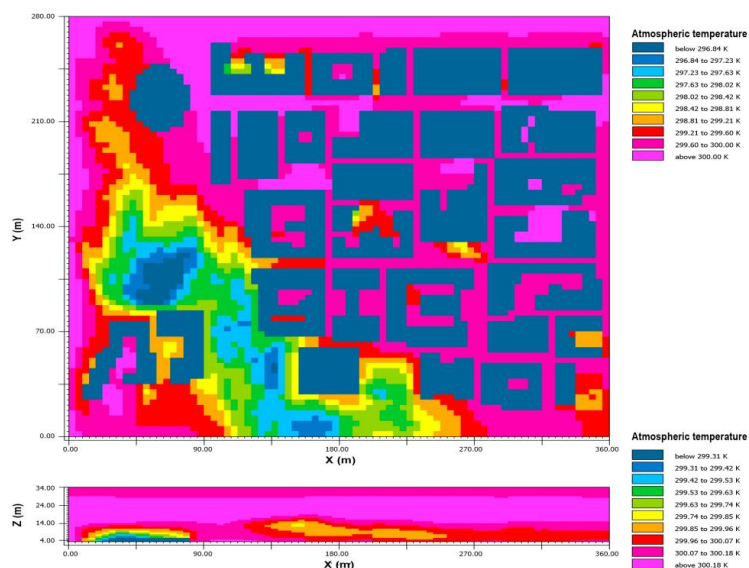


Fig. 4: Exemple de représentations de la température de l'air à 1,2 m du sol, 02:00 AM, 23 July 2013³

² Etude 'Nos-arbres'. Université de Genève, Plante&Cit , Ville de Genève. 2018

³ Ambrosini, D. & all; Evaluating Mitigation Effects of Urban Heat Islands in a Historical Small Center with the ENVI-Met Climate Model. Sustainability 2014, 6, 7013-7029; doi:10.3390/su6107013

A l'heure actuelle, la mesure sur le terrain reste l'approche la plus adaptée à l'échelle "micro", c'est à dire celle du piéton, premier bénéficiaire d'un bon confort climatique, avec les autres organismes vivants.

Cette approche permet aussi d'être calquée sur la vraie situation urbaine (matérialité, occupation des espaces) et ne nécessite pas d'établir des hypothèses de calcul ou encore des définitions aux conditions de limite, car c'est le propre de la mesure d'intégrer tout cela dans les valeurs réelles mesurées. L'effort peut ainsi se focaliser sur l'interprétation des données.

Depuis deux décennies diverses campagnes de mesures sur le microclimat urbain tentent d'apporter des réponses. Certaines études ont développé des protocoles de mesures extrêmement pointus dans le but de reconstituer dans ses plus fins détails le climat de la ville en effectuant des mesures d'un grand nombre de paramètres dans différents contextes et en tenant compte spécifiquement de la géométrie et de la composition de la ville⁴. Nombreuses expériences ont été réalisées, notamment le suivi de gaz traceur à proximité de la couche limite urbaine dessinée par les toitures de la ville ou alors la simulation des déplacements d'air en soufflerie. Parallèlement à ces expériences de terrain, un modèle de méso-échelle intégrant une paramétrisation des échanges de surface a été testé et développé. De tels projets visent à mieux comprendre le climat de la ville mais demeurent très éloignés en soi de l'utilisateur.

D'autres études ont privilégié la mise en relation de mesures micro-climatologiques objectives avec la perception des usagers des espaces publics interviewés et observés à proximité de ces points⁵. Réalisées avec des équipements hérités des stations météorologiques fixes et peu adaptées (temps de réponse et géométrie) à des acquisitions en mouvement, leur encombrement et disposition n'ont que difficilement permis de tirer des conclusions sur l'effet du microclimat urbain sur un sujet humain ou végétal. L'originalité de ces installations est le signe qu'il s'agit d'une science naissante. Au même titre, les indicateurs censés représenter mieux que la température de l'air le confort ressenti sont multiples et ne font pas encore l'objet d'un consensus (Johanssen, E. & al, 2013).



Fig. 5: Illustration d'une des nombreuses initiatives de mesure microclimatique, Chicago (crédit photo Paul Coseo)

Sur la base de ces constats, nous n'avons pas encore trouvé une ville avec un réseau de mesures climatiques longue durée de qualité au niveau des piétons, avec une densité élevée de points de mesure et dont le protocole de mesure prend en compte le métabolisme humain respectivement l'environnement proche des éléments végétaux.

⁴ projet Bubble - Basel UrBan Boundary Layer Experiment, Rotach et al. 2005

⁵ projet RUROS, Nikolopoulou et al. 2006

2. Méthode

En anticipation à l'importance croissante accordée à la qualité de vie urbaine et constatant l'inadéquation des instruments existants à la granulométrie des nouvelles questions posées, hepia a développé un protocole de mesures et son instrument - le microclimatmètre - qui constitue le cœur de la méthode *CityFeel*.

Le *microclimatmètre* se présente sous la forme d'un sac à dos léger et compact qui se porte facilement lors de parcours climatiques réalisés à la vitesse et au niveau du piéton dans n'importe quel endroit en ville.

Il est composé de plusieurs capteurs de températures ambiantes (T) et rayonnantes (Tr), humidité (HR) et mouvements d'air (vent), rayonnement solaire (Gh), environnement visuel hémisphérique (vue) dont sont extraits certains indicateurs urbains (sky view), mais aussi la qualité de l'air (CO₂, NO_x, Ozone, PM_{2,5-10}), le bruit et la bande son. Il comporte également une plateforme inertielle, un GPS et un système d'enregistrement des données.

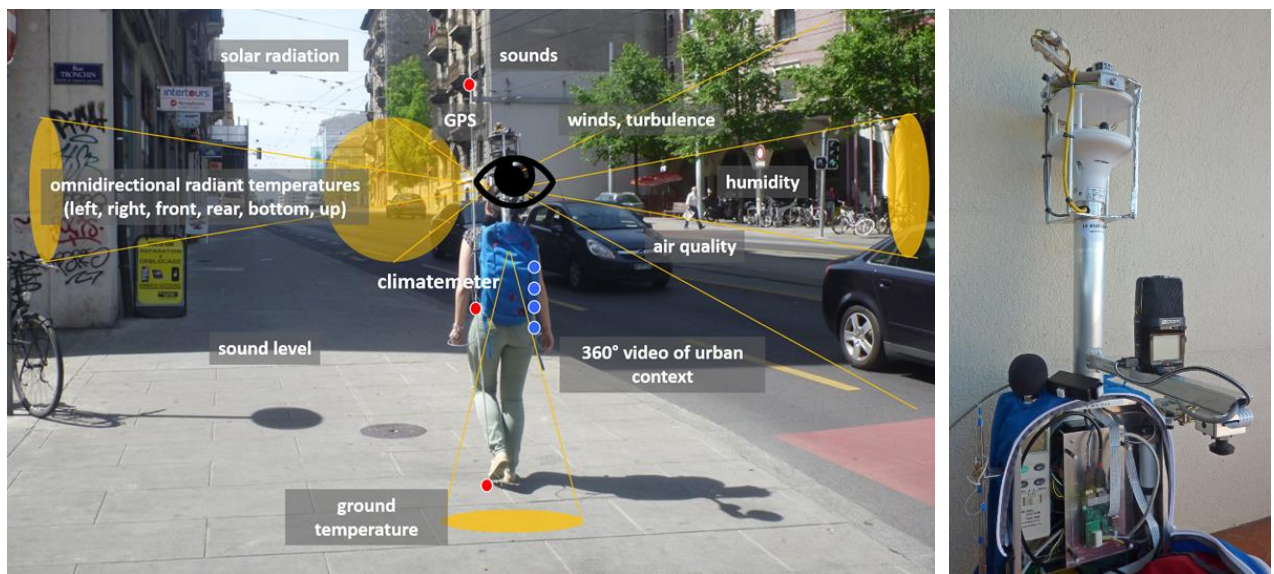


Fig. 6: Parcours climatique avec le climatmètre (© hepia, photo Reto Camponovo)

L'instrumentation permet de relever plus de 20 paramètres. Les valeurs relevées correspondent à la vraie situation urbaine (matérialité, végétation, morphologie) ce qui permet de mesurer et de caractériser de façon objective et détaillée la scène climatique ressentie par un sujet ou encore à qualifier le contexte climatique qui va conditionner le développement du végétal en ville sans avoir à établir d'hypothèses.

Ainsi le temps libéré peut être entièrement consacré à l'interprétation approfondie des données, ce qui constitue la phase essentielle à la compréhension des interactions microclimatiques.

Les données recueillies par les capteurs alimentent notamment un modèle de bilan thermique du corps humain pour évaluer la température physiologique équivalente (PET), qui est définie comme étant la température équivalente ayant une sensation de chaleur comparable dans des conditions environnementales contrôlées sans radiation, vent, etc. D'autres indicateurs de confort ou de stress usuels, tels que le PMV - Predicted Mean Vote, l'UTCI - Universal Thermal Climate Index, l'HUMIDEX - Humidity Index, le WBGT - Wet Bulb Globe Temperature, etc. sont également calculés.

Le dispositif étant entièrement configurable, des nouveaux indicateurs peuvent être facilement évalués et implémentés.

Sensor	Resolution	Absolute error
Ambient temperature	0.1°C	0.2°C
High speed temperature	0.1°C	0.4°C
Relative humidity	0.1%	1%
Radiant temperature (left, right ... up, down)	0.1°C	0.5°C
Solar radiation	1W/m2	1.5%
Wind speed	0.01m/s	1%
Sound pressure	1dB	3%
Position (GPS)	0.1m	<10m

Tab. 1: Tableau des caractéristiques des capteurs physiques utilisés

L'ensemble des mesures, y compris les images hémisphériques et le niveau sonore, sont enregistrées toutes les secondes; le son est enregistré en continu. L'autonomie actuelle du microclimatmètre est de 4 heures, limitée uniquement par la capacité de la batterie LiPo et la quantité de mémoire installée.

A la fin de la session de mesures, l'opérateur transfère les données recueillies à un ordinateur de bureau où un script agrège toutes les données recueillies et les convertit dans un format approprié pour le post-traitement. Les données sont ensuite stockées sur une base de données en ligne.

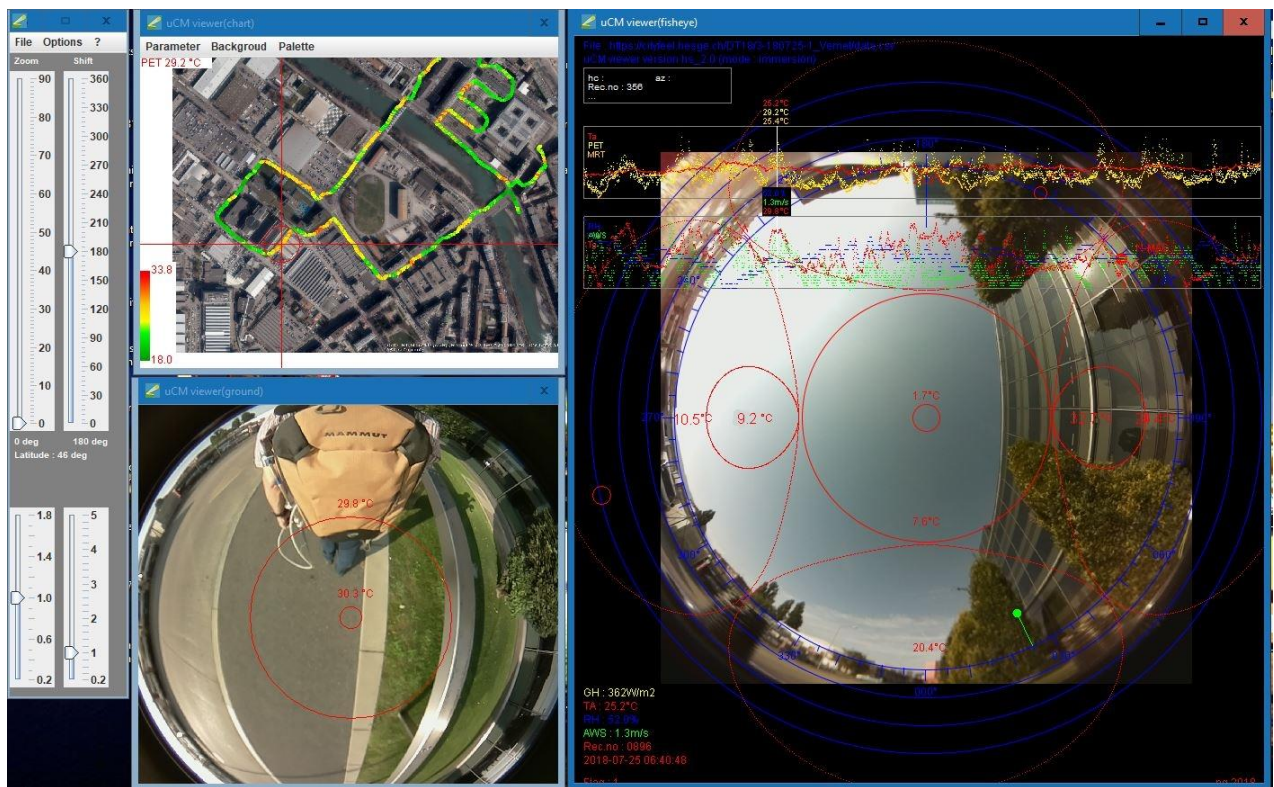


Fig. 7: Illustration du uCM-viewer (© hepia, Peter Gallinelli)

Un programme spécialement développé - le μ CM-Viewer - facilite l'observation et l'interprétation des données recueillies à l'aide d'une interface utilisateur graphique dédiée, ce qui permet de repasser et analyser ex post les trajets climatiques réalisés d'une façon quasi-immersive.

Les analyses statistiques complémentaires peuvent être effectuées avec des logiciels traditionnels tels que ArcGIS, Matlab®, Statistica® ou R, utilisés pour sectoriser, analyser et visualiser les données. Les algorithmes d'apprentissage machine s'occupent de l'analyse d'images connexes, comme le facteur de vue du ciel (SVF) ou les indices de végétation.

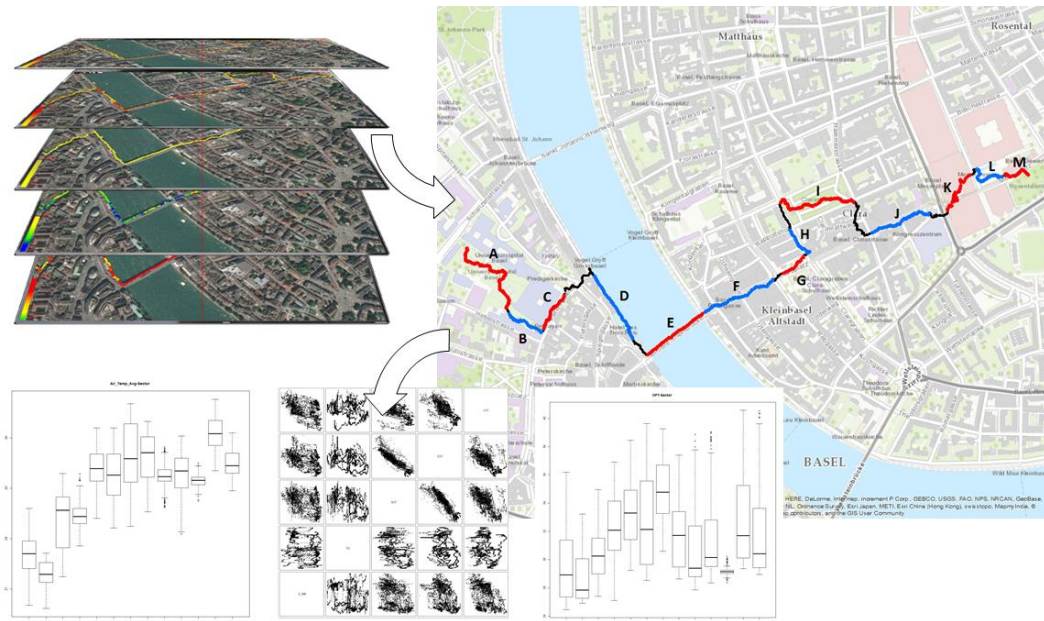


Fig. 8: Illustration du processus d'analyse des données : visualisation des données brutes, sectorisation, analyse statistique. (© hepia)

3. Résultats

Les mesures obtenues sur le terrain avec le *microclimatmètre* dans le cadre du projet P&D Klimaangepasste Stadtentwicklung (OFEV et ARE, 2016) dans plusieurs grandes villes suisses ont permis de consolider la méthode *CityFeel* et de mettre d'emblée en évidence des situations que les courants d'idées autour de la participation réelle au rafraîchissement des arbres ou plans d'eau, ou encore les modèles numériques, ne sont pas en mesure d'expliquer.

L'extrait suivant introduit un certain nombre de situations ayant servi à valider le protocole ainsi que l'adéquation de la méthode et du climatmètre aux questions posées et à l'échelle d'analyse (granulométrie).

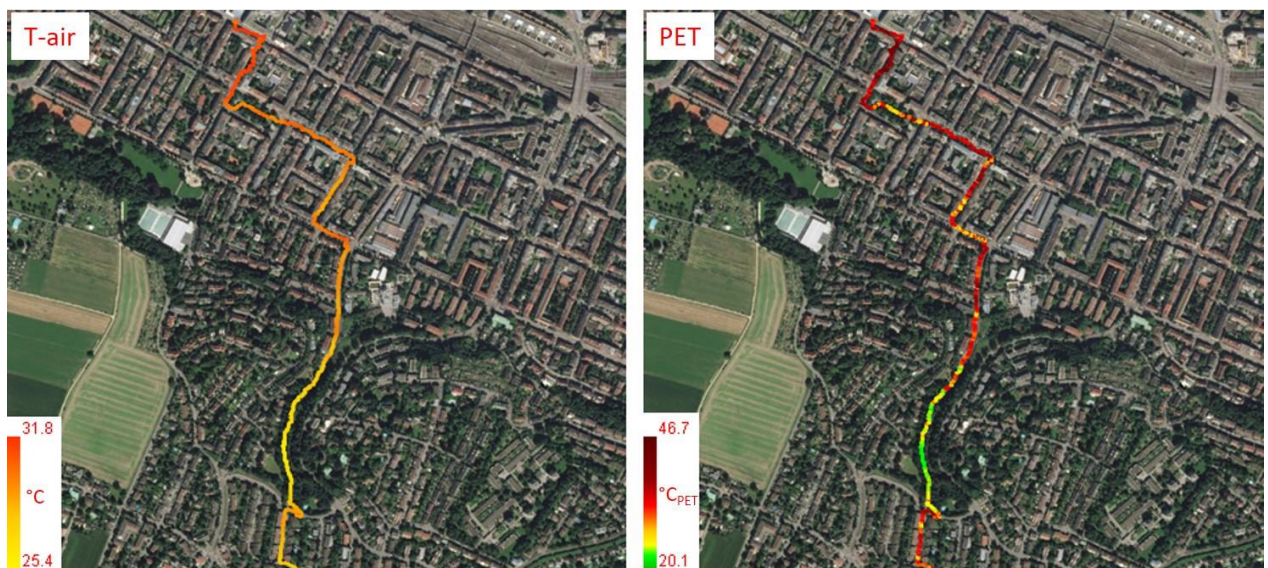


Fig. 9: Comparaison entre température de l'air (à gauche) et température physiologique équivalente PET (à droite) (Bâle, 04-08-16)

La température de l'air n'est pas suffisamment représentative du ressenti humain. La PET - température physiologique équivalente (selon P. Höppe, 1999) est facilement compréhensible et se rapproche le plus de la sensation de chaleur réelle.

3.1 Effets d'ombrage et variétés de configurations.

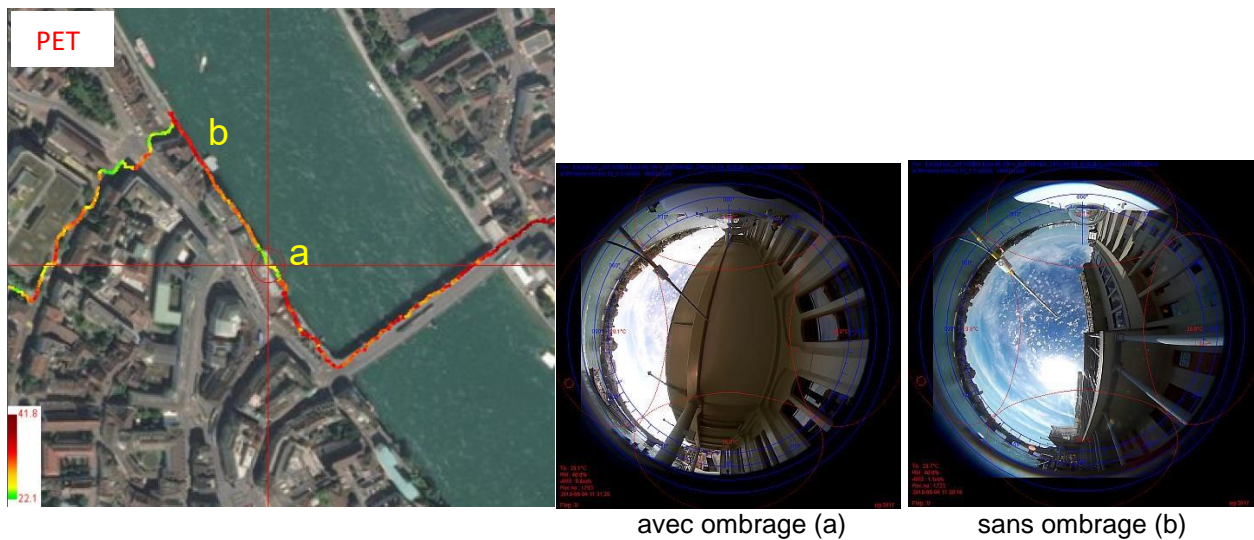


Fig. 10: Chemin le long du Rhin. Température de l'air 28,5°C ; PET 25°C_{PET} dans le secteur vert a (sous un balcon), comparé à 34°C dans les secteurs rouges b (sans ombre) (Bâle, 04-08-16)

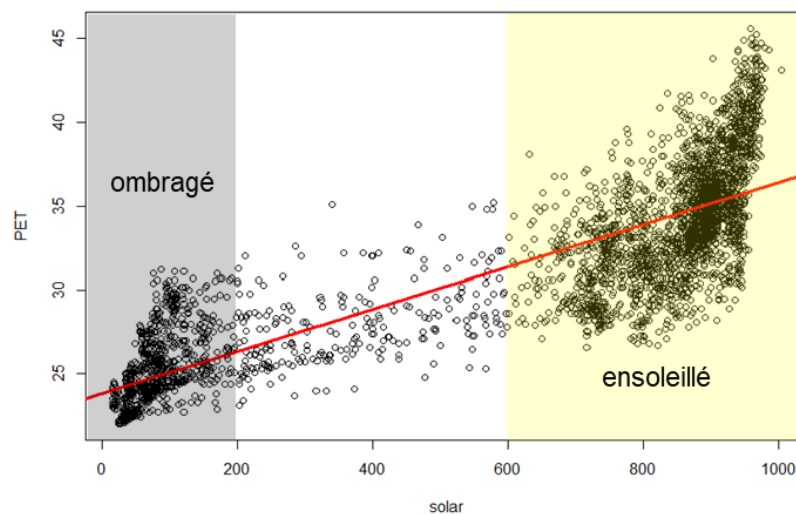


Fig. 11: Influence de l'effet d'ombrage sur la perception thermique (PET) (Bâle, 04-08-16)

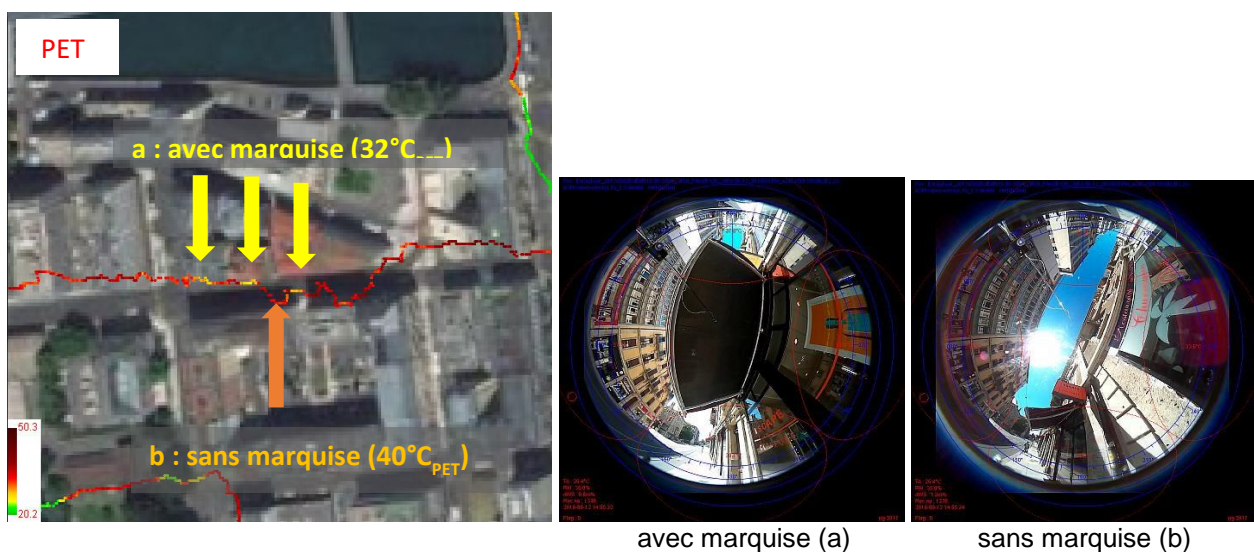


Fig. 12: Situations contigües avec PET 31,2°C_{PET} dans les secteurs jaunes (avec marquise) et PET 39,8°C_{PET} dans les secteurs rouges (sans marquise), bien identifiable sur la chaussée ($\Delta m = 10^\circ C_{PET}$) (Genève, 26-08-16)

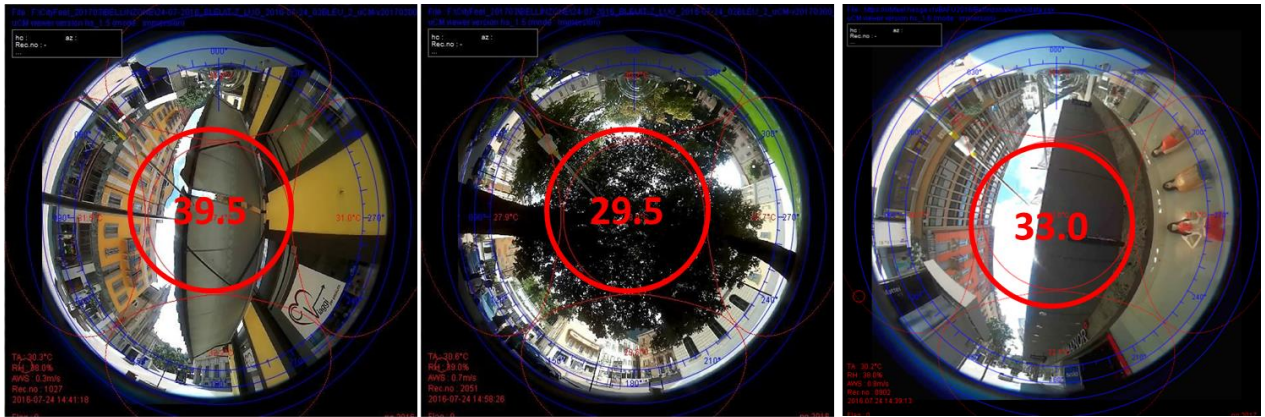


Fig. 13: La température de l'air est de 30.5°C. La température de surface de la toile de protection solaire est plus élevée de 9.5°C, celle de l'arbre est inférieure de 1°C et celle de l'avant-toit est plus chaude de 2.5°C (Bellinzona 24-07-16)

3.2 Effet miroir.

Le rayonnement direct du soleil est l'un des facteurs qui influencent fortement le stress thermique. Les surfaces peuvent réfléchir directement le rayonnement solaire, comme c'est le cas pour les façades vitrées des bâtiments et les revêtements métalliques réfléchissants, par exemple.



Fig. 14: Réflexions et effets de miroir sur les façades vitrées. Gh = rayonnement solaire global horizontal; sur la place, le rayonnement solaire incident est de 850 W/m²; devant la façade réfléchissante (image de droite), le rayonnement s'élève à plus de 1000 W/m². (Bâle 04-08-16)

3.3 Végétation et évaporation

En principe, si l'eau est suffisante, la transpiration du végétal peut avoir un effet rafraîchissant sur l'environnement : les pelouses ont plus facilement une température de surface plus basse et donc agréable.

Cependant, du fait de l'intensité croissante des flux thermiques chauds spécialement en milieu urbain, l'effet rafraîchissant lié à l'évaporation du végétal devient imperceptible.

De plus l'effet rafraîchissant disparaît complètement dès que les plantes souffrent de stress hydrique, ce qui peut se produire pendant les périodes les plus chaudes et les plus sèches. En conditions sèches, les stomates se ferment et réduisent l'évaporation. Ceci est particulièrement remarquable dans les zones à faible capacité de rétention d'eau, comme les toits verts extensifs, les parkings souterrains plantés, mais aussi sur les plantes à racines superficielles, comme les pelouses. Les images suivantes illustrent différentes situation d'une pelouse arrosée et d'une pelouse souffrant de stress hydrique (voies de tram vertes).

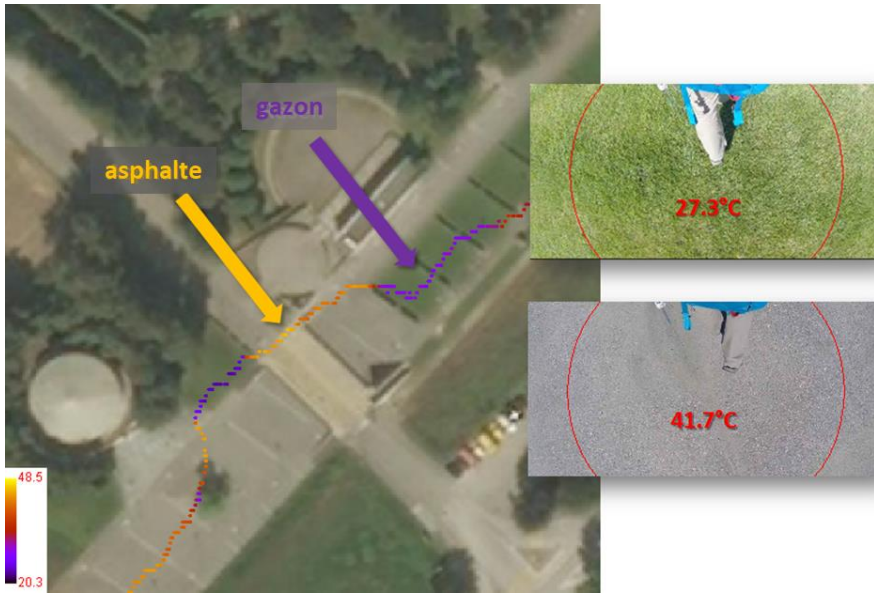


Fig. 15: Différences de température du sol entre l'asphalte et la pelouse (régulièrement arrosée) (Sion 03-08-16)



Fig. 16: La température de surface (T_{grd}) des pelouses soumises à un stress hydrique (41°C : secteur C) est supérieure à la température de l'asphalte adjacent (39°C : secteur B). Le secteur A se trouve ombragé par une rangée d'arbres (Bâle 04-08-16)

Les situations suivantes ont également fait l'objet de vérifications: asymétrie de température, émissivité des surfaces, géométrie et angle solide, places ouvertes, réflexion sur les surfaces d'eau, végétation au niveau des piétons, les arbres comme protection solaire, fontaines et jeu d'eau, rivières, étangs, vents.

4. Discussion

L'interaction de la ville et du climat est un processus très complexe et est déterminée par de nombreux facteurs d'influence. S'y ajoutent les conditions météorologiques, l'heure de la journée, l'utilisation (différences entre le travail et les vacances) et bien d'autres dimensions encore. En supposant que les variations sur une courte période de temps sont faibles, un examen attentif des données de mesure donne des indices précieux sur la compréhension du métabolisme urbain.

Pour mesurer les données pertinentes, les journées ensoleillées et chaudes avec peu de vent ont été préférées dans la phase de validation. En ce qui concerne le climat et les effets du point de vue des piétons, ceux-ci correspondent aux situations les plus critiques où des mesures de refroidissement sont souhaitables.

La comparaison suivante des tendances à différents jours et heures se recoupe très bien. On peut en déduire qu'en théorie un seul parcours climatique serait déjà suffisamment significatif.

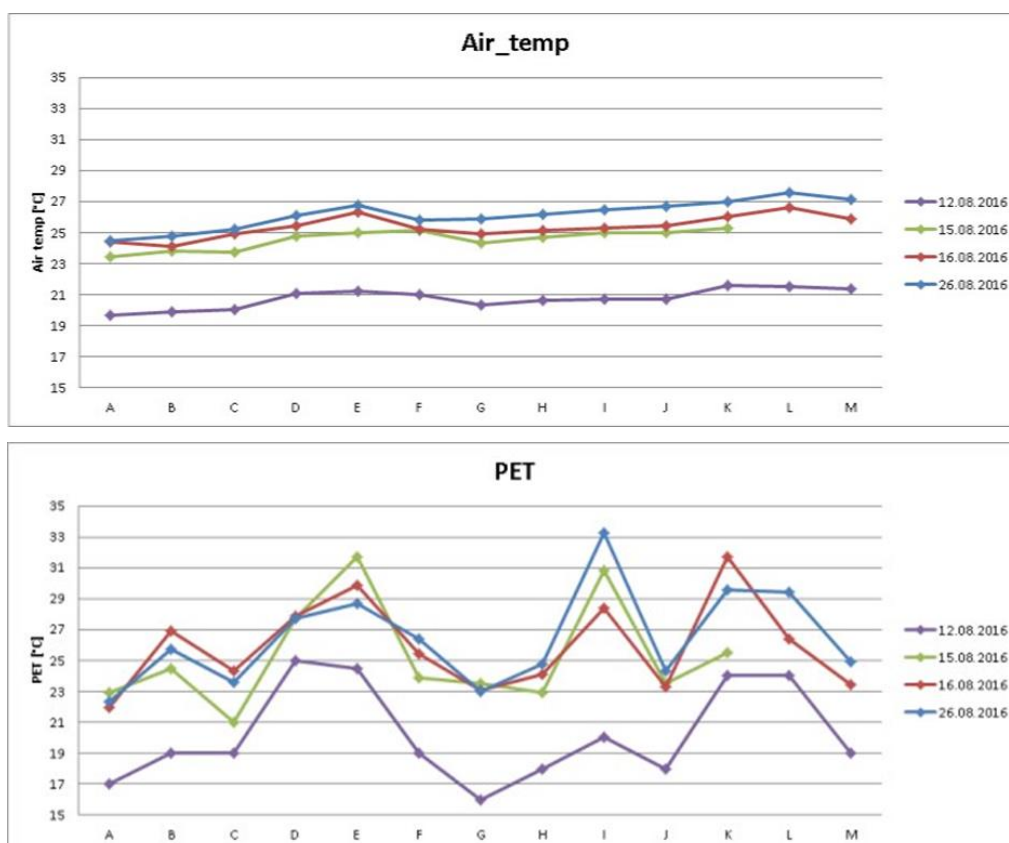


Fig. 17: Comparaison des profils de température et PET pour des parcours climatiques identiques à différents jours et heures (Genève 12, 15, 16 et 26-08-16)

L'efficacité des stratégies climatiques dans le monde réel et les meilleures options peuvent être identifiées par l'observation de solutions comparatives à différentes périodes et à différents moments de la journée. Les parcours climatiques sont également utiles pour identifier les endroits où le stress thermique et la pollution sont les moins importants. Ces connaissances peuvent être utilisées pour informer la population et pour identifier les stratégies locales d'adaptation et d'atténuation. L'analyse des paramètres tels que PET, UTCI, humidité, vent, etc.... montrent une forte corrélation entre la morphologie urbaine et les paramètres affectant le confort et la santé de l'homme à l'extérieur.

5. Perspectives

Actuellement 4 climatmètres sont disponibles, ce qui permet de couvrir simultanément plusieurs endroits d'une même ville ou alors de les répartir dans plusieurs villes. Des nouveaux exemplaires sont prévus et devraient bénéficier de perfectionnements issus de l'expérience utilisateur.

Un nouveau projet de Ra&D - macadam⁶ - a débuté au moins de mai 2018 et va nous permettre de monitorer de nouvelles situations urbaines et de mieux comprendre les contributions réelles au microclimat urbain de certains éléments, en particulier du végétal, de l'eau et des enveloppes urbaines.

Conjointement nous travaillons au développement d'une plateforme participative autour de la démarche *CityFeel* dans le but de créer un réseau de villes à l'échelle nationale/internationale intéressées à monitorer des situations locales avec le climatmètre. Ceci contribueraient à augmenter le nombre d'études de cas et ainsi enrichir la base de connaissances, la finalité étant que toutes ces expériences au niveau de la gestion du confort et du vert/bleu en ville puissent être partagées. Toute entité (publique, académique, professionnelle) intéressée peut contacter l'auteur.

Ceci va permettre aux autorités publiques et aux aménagistes de proposer des projets d'aménagement robustes en matière de bien-être des piétons et du végétal.

Littérature/références

Jendritzky, G., Menz, G., Schirmer, H., Schmidt-Kessen, W., "Methodik zur raumbezogenen Bewertung der thermischen Komponente im Bioklima des Menschen" W., Beiträge d. Akad. f. Raumforschung und Landesplanung Bd. 114, 1990

Höppe, P., "The physiological equivalent temperature – a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment", International Journal of Biometeorology, Volume 43, Issue 2, pp 71–75, October 1999

ISO 7730, "Ergonomics of the thermal environment -- Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria", ISO, 2005

Matzarakis, A., Mayer, H., "Another Kind of Environmental Stress: Thermal Stress.", Newsletters No. 18, 7-10. WHO Collaborating Centre for Air Quality Management and Air Pollution Control, 1996

Gallinelli, P., Crivellini, D., Camponovo, R., "Enveloppes végétales", Rapport final du projet ENV-VEG, hepia, 2012

Masuda, T. Takashima, Y. Takayama, "Emissivity of pure and sea waters for the model sea surface in the infrared window regions", Remote Sens. Environ., vol. 24, no. 2, pp. 313-329, Mar. 1988

Dousset B., Gourmelon F., Laaidi K., Zeghnoun A., Giraud-det E., Bretin P., Mauri E., Vandentorren S. 2011 : Satellite monitoring of summer heat waves in the Paris metropolitan area. In : International Journal of Climatology, 31(2) : pp. 313 – 323.

Johanssen, E., Thorsson, S., Rohinton, E., Krüger, E. (2013). Instruments and methods in outdoor thermal comfort studies - The need for standardization. Urban Climate 10 (2014), 346-366

Golnoosh, M., Hasanuddin, B.L. et Dilshan, R. (2015). Water Bodies an Urban Microclimate: A Review. Modern Applied Science; Vol. 9, No. 6.

MétéoSuisse (Office fédéral de météorologie et climatologie) 2016a : Der Hitzesommer 2015 in der Schweiz. Rapport technique n° 260, Zurich : 68 p.

Hitze in den Städten. Grundlagen für eine klimaangepasste Stadtentwicklung, BAFU, ARE, 2018 (à paraître)

⁶ *Macadam - Mitigation of Climate change by Design, Adaptation and Monitoring. Hes-so / Nature & Ville.*