



Humidité relative, pression partielle de vapeur d'eau et îlot de sécheresse à Strasbourg (France)

Pierre Kastendeuch, Georges Najjar, Nathalia Philipps

► To cite this version:

Pierre Kastendeuch, Georges Najjar, Nathalia Philipps. Humidité relative, pression partielle de vapeur d'eau et îlot de sécheresse à Strasbourg (France). Colloque AIC2020, 20, 26 et 27 Novembre 2020, Nov 2020, En ligne, France. <hal-03926479>

HAL Id: hal-03926479

<https://hal.science/hal-03926479v1>

Submitted on 6 Jan 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization

HUMIDITE RELATIVE, PRESSION PARTIELLE DE VAPEUR D'EAU ET ILOT DE SECHERESSE A STRASBOURG (FRANCE)

KASTENDEUCH P.P. (1), NAJJAR G. (1), PHILIPPS N. (1)

(1) Laboratoire ICUBE, Université de Strasbourg, France, kasten@unistra.fr

Résumé : *Les différences d'humidité ont été analysées entre la ville de Strasbourg (France) et la campagne, à partir des données horaires de trois stations météorologiques sur une période de huit ans (2011-2018). Du point de vue de l'humidité relative, la ville est un îlot de sécheresse urbain (ISU) quasi permanent, avec un pic d'intensité en été et la nuit. Cet îlot de sécheresse est occasionné par l'îlot de chaleur urbain (ICU) et peut aussi être modulé par la présence de végétation. La ville peut parfois devenir exceptionnellement un îlot d'humidité urbain (IHU), ce qui se produit quand elle subit un îlot de fraîcheur urbain (IFU), surtout en hiver. Du point de vue de la pression partielle en vapeur d'eau, on observe une alternance saisonnière et diurne systématique entre un ISU en été (ou en journée) et un IHU en hiver (ou la nuit).*

Mots clés: *îlot de sécheresse, humidité de l'air, pression de vapeur, climat urbain, Strasbourg.*

Summary: *The urban/rural humidity differences were analyzed for Strasbourg city (France) by means of meteorological series of three stations during a period of eight years (2011-2018). From the relative humidity point of view, the town shows a clear drought urban island (ISU) during the whole year and particularly during summer and night. This drought island is related to the urban heat island (ICU) and can be modulated by vegetation. The town can exceptionally become a moisture island (IHU), mostly in case of urban cool island (IFU). This phenomenon is more frequent in winter. From the water vapor pressure point of view, a systematic seasonal and diurnal alternation is observed between an ISU in summer (or during the day) and an IHU in winter (or at night).*

Key words: *drought island, humidity, vapour pressure, urban climate, Strasbourg.*

Introduction

La zone urbaine n'affecte pas seulement la température de l'air, mais aussi d'autres variables comme l'humidité de l'air. Cette variable a été étudiée pour un certain nombre de villes dans le monde : Mexico, Londres, Vancouver, Leicester, etc. (Chandler, 1967 ; Kopec, 1973 ; Ackerman, 1987 ; Lee, 1991 ; Unger, 1999). Dans les villes citées, ces études ont montré que les agglomérations sont en général caractérisées par une humidité globalement plus faible que celle des zones rurales. La ville forme alors un îlot de sécheresse urbain (ISU), aussi bien du point de vue de l'humidité relative que de celui de la pression partielle en vapeur d'eau. Pour l'humidité relative, c'est particulièrement le cas la nuit et en été, quand les îlots de chaleur sont maximums. En effet, les variations d'humidité relative sont particulièrement sensibles aux moindres variations de températures et ces deux variables évoluent en sens inverse l'une de l'autre. En ce qui concerne le contenu en vapeur d'eau, l'ISU se manifeste surtout le jour, en été lorsque les températures dans les deux milieux sont quasiment équivalentes et que les émissions de vapeur d'eau par les surfaces artificielles sont négligeables, comparé aux surfaces naturelles.

Dans certaines circonstances exceptionnelles, le contenu de vapeur d'eau en ville peut parfois devenir supérieur à celui de la campagne (Ackerman, 1987). Ce phénomène forme alors ce que certains auteurs appellent « l'îlot d'humidité urbain » ou IHU (Richards, 2005). Selon ces auteurs, cela se produit surtout pendant les nuits claires d'été, sans vent, alors que l'humidité relative urbaine est pourtant plus faible qu'à la campagne. Cet excédent de vapeur d'eau s'explique essentiellement par la présence d'un îlot de chaleur urbain (ICU) qui

maintient une forte capacité hygrométrique de l'air en ville alors qu'il se produit une élimination de vapeur d'eau à la campagne par dépôt de rosée.

Cette étude a pour objectif principal de vérifier dans quelle mesure ce qui a été constaté par ailleurs sur différentes villes dans le monde s'observe à Strasbourg, ce qui se justifie d'autant plus qu'aucun travail de ce type, à notre connaissance, n'existe pour d'autres villes françaises.

1. Site d'étude, matériel et méthodes

L'agglomération de Strasbourg (France, 48,583° N, 7,745° E) occupe une superficie de 340 km² et rassemble près de 490 000 habitants d'après les données INSEE de 2013, soit une densité de 1441 h/km². La ville est quasiment plane et contient très peu de dénivelé ce qui est un atout essentiel pour cette étude topoclimatique car on sait que le relief influence la répartition des températures et de l'humidité. Le climat régional est de type tempéré (Cfb dégradé) selon la classification de Köppen-Geiger. Le tissu urbain a fait l'objet d'une classification en Local Climate Zones (LCZ) selon la norme de Stewart et Oke (2012), par Montauban (2019).

Strasbourg bénéficie d'un réseau de stations météorologiques parmi lequel nous présentons les résultats de trois stations sélectionnées selon l'originalité du site et l'étendue de la série temporelle. La référence rurale est donnée par la station météorologique d'Entzheim qui fait partie du réseau d'observation synoptique de Météo-France, et qui se situe dans une LCZ de type D (*low plants*) avec plus de 95 % de surfaces naturelles dans un rayon de 200 m. Le milieu urbain est représenté par deux stations : 1) la station « DRIRE » qui est gérée par Atmo Grand Est et qui est installée au cœur de la ville, sur le toit d'un bâtiment à 20m, dans une LCZ de type 2 (*compact mid-rise*) et entourée par un tissu urbain très artificiel ; 2) la station « Jardin Botanique » gérée par Météo-France et qui est installée dans un parc urbain de 4,8 ha, lui-même entouré de toute part d'une LCZ de type 2.

Pour garantir une certaine robustesse statistique à ce travail, nous avons choisi d'exploiter les données horaires d'une période de huit ans (2011-2018). Tous les capteurs sont de même type sur tous les sites, ils sont régulièrement étalonnés et sont installés dans des abris de type SOCRIMA à coupelles. La pression partielle en vapeur d'eau n'étant pas directement mesurée, elle a été calculée à l'aide de la méthode classique qui consiste à combiner la pression de vapeur saturante (formule de Tetens) et l'humidité relative.

2. L'humidité relative

L'humidité relative est une variable dont le comportement dépend fortement de la température de l'air. Puisque le site DRIRE est plus chaud en moyenne annuelle (13,4°C) que le site du Jardin Botanique (12,1°C) et Entzheim (11,7°C), il n'est pas étonnant de constater qu'il s'agit aussi du site avec l'humidité relative la plus basse : 67,2% contre 73,2% et 75,4% respectivement pour les deux autres sites. Ce déficit d'humidité est bien la démonstration d'un îlot de sécheresse urbain annuel persistant (ISU). Il faut néanmoins nuancer cette affirmation puisque l'intensité de cet ISU varie dans le temps, au plan mensuel et horaire (Figure 1).

Ce déficit s'observe grâce à la différence d'humidité relative (ΔHR) calculée par rapport à la référence rurale. L'ISU entre DRIRE et Entzheim (ΔHR négatif) s'intensifie pendant les mois d'été (Figure 1 à gauche) pour deux raisons : 1) l'ISU se renforce en été dans ce quartier fortement bâti ; 2) la zone rurale est en pleine activité photosynthétique ce qui lui permet d'émettre de la vapeur d'eau. Le Jardin Botanique suit un comportement quasiment opposé,

avec un ISU quasiment nul en été mais qui se renforce en hiver : comme le parc urbain émet de la vapeur d'eau en été, il limite le déficit d'humidité relative d'autant plus facilement que l'ICU y est aussi moins intense. Comme on l'observe sur la Figure 1 à droite, l'ISU est surtout un phénomène nocturne dont l'intensité augmente la nuit. Il est permanent en journée dans le quartier fortement urbanisé (DRIRE), ce qui n'est pas le cas dans le parc (Botanique). Grâce à la végétation qui l'entoure, ce site devient même parfois un léger îlot d'humidité urbain (IHU) le matin ou fin d'après-midi. Pour la station DRIRE, l'ISU concerne 94 % des observations estivales contre 63,7 % pour Botanique (IHU = 6% et 36,3 % respectivement).

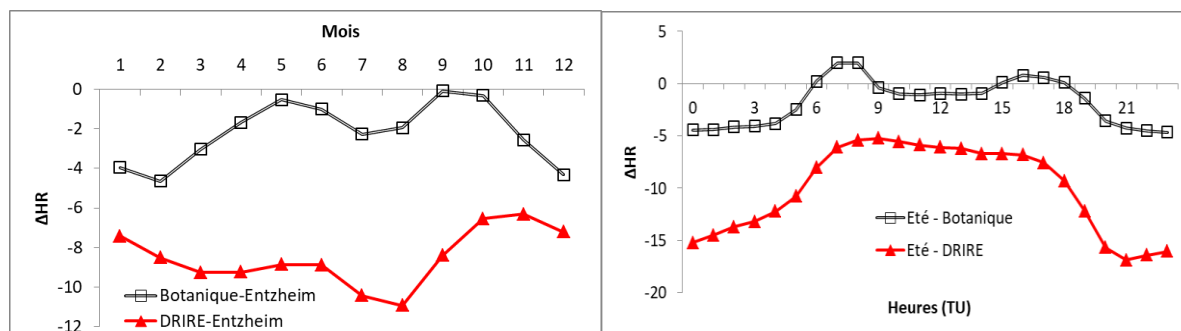


Figure 1. Evolution de la différence d'humidité relative (ΔHR) obtenue par rapport à la référence rurale pour deux stations urbaines à Strasbourg pendant la période 2011-2018. A gauche l'évolution mensuelle et à droite l'évolution horaire pour la saison d'été uniquement.

Charciarek (2003) a démontré que l'intensité de l'ISU ne dépend pas uniquement du niveau de végétation de la zone urbaine, mais aussi de l'intensité de l'ICU. Cette hypothèse se vérifie pour le site DRIRE (Figure 2) avec une bonne corrélation linéaire entre ICU et ISU pour la saison d'été ($r = -0,85$).

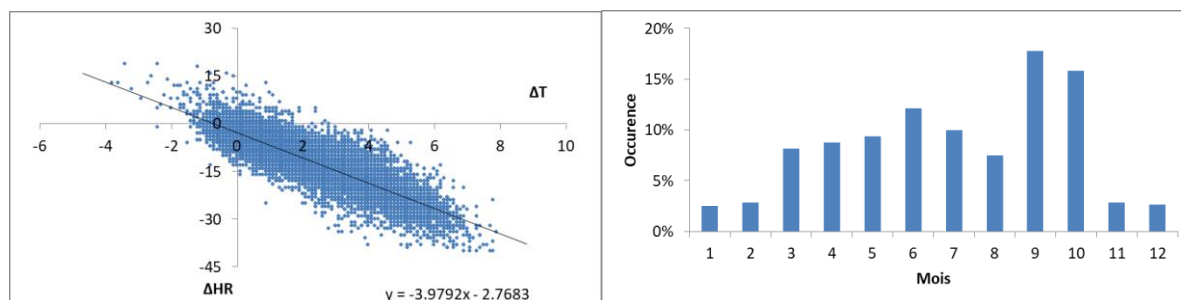


Figure 2. Relation entre le ΔT (axe des abscisses) et le ΔHR (axe des ordonnées), pour DRIRE, en été (à gauche) ; Fréquence mensuelle d'apparition simultanée de l'IHU et de l'IFU pour DRIRE (à droite). Période 2011-2018.

Cette relation tendrait à prouver qu'en agissant sur l'ICU, il serait possible d'agir sur l'ISU. Elle montre aussi que, dans certains cas, cette station enregistre un îlot de fraîcheur (ΔT négatif) en même temps qu'un îlot d'humidité (ΔHR positif). Cette situation correspond à un couplage entre IHU et IFU. Les analyses montrent que ce couplage se forme surtout lorsque les conditions météorologiques ne sont pas propices à un bon réchauffement de la zone urbaine au cours de la matinée (temps couvert), ce qui favorise la conservation d'une humidité relative plus élevée dans les canyons urbains confinés, alors que l'espace ouvert de la zone rurale permet déjà un certain réchauffement qui s'accompagne forcément d'une baisse de l'humidité relative. La répartition mensuelle de ce couplage révèle que le phénomène est plus fréquent en saison chaude qu'en saison froide (Figure 2 à droite). Par ailleurs, septembre et octobre apparaissent très nettement comme étant les mois les plus propices. Peut-être qu'à cette période de l'année, les champs laissés à nu par les agriculteurs s'échauffent plus facilement que les canyons urbains et que l'humidité relative y chute d'autant plus aisément que la transpiration ne s'exerce plus du fait de l'absence de végétation.

3. La pression partielle en vapeur d'eau

La variation de la pression partielle en vapeur d'eau n'est pas aussi facile à interpréter que celle de l'humidité relative pour laquelle la température joue un rôle vraiment primordial. Les variations de vapeur d'eau dépendent de l'advection ainsi que de l'évapotranspiration et de la condensation locale. Les caractéristiques du site deviennent déterminantes comme : le type des surfaces environnantes (naturelles ou artificielles), l'état hydrique de ces surfaces, l'activité des plantes, les pratiques culturales, les sources d'émissions anthropiques.

En moyenne annuelle, la pression partielle en vapeur d'eau est assez similaire pour les trois sites. Elle est de 10,5 hPa pour DRIRE, 10,7 hPa pour Entzheim et 10,8 hPa pour Botanique. C'est une situation conforme aux observations faites par d'autres auteurs comme Ackerman (1987) à Chicago ou Charciarek (2003) pour Lodz. Cette homogénéité annuelle de la teneur en vapeur d'eau cache pourtant de subtiles différences entre sites au niveau mensuel ou horaire.

L'évolution mensuelle en vapeur d'eau est quasiment identique pour Botanique et Entzheim, comme le prouve d'ailleurs la valeur du Δe qui est toujours très proche de zéro (Figure 3, à gauche). En septembre et octobre on observe tout de même une exception puisque le Δe entre Botanique et Entzheim devient soudain positif : le parc urbain produit un léger IHU de vapeur de plus de 0,36 hPa. Cet excédent d'arrière-saison pourrait avoir deux explications complémentaires : 1) la végétation toujours active du parc continue à alimenter l'air en vapeur d'eau tandis qu'à la campagne les champs labourés ne le font plus autant ; 2) les arbres du parc réduisent la durée d'ensoleillement du site le matin et le soir, ce qui retarde le réchauffement matinal et avance le rafraîchissement nocturne par rapport à la zone rurale, ce qui stabilise l'air (inversion thermique) et confine la vapeur d'eau en surface. Le comportement de DRIRE est marqué par son caractère très urbain qui se voit immédiatement sur la courbe des Δe mensuels (Figure 3, à gauche). Le contenu en vapeur d'eau y est en moyenne supérieur à celui de la campagne durant la saison froide (Δe positif d'octobre à février, situation d'IHU) et largement inférieur durant la saison chaude (Δe négatif de mars à août, situation d'ISU). L'IHU hivernal peut s'expliquer par la chaleur de la ville (ICU + chaleur anthropique) qui maintient une bonne capacité hygrométrique de l'air, tandis que le déficit estival s'explique plutôt par la faiblesse des émissions en vapeur d'eau du côté urbanisé, qui contraste avec l'intense évapotranspiration de la zone rurale. Pour simplifier l'analyse de l'évolution horaire de la vapeur d'eau, nous ne présenterons ici que les résultats de l'été (Figure 3, à droite). L'ISU est surtout présent le jour et il est très intense à DRIRE, tandis qu'à Botanique la végétation limite le déficit de manière plutôt assez efficace. Ce déficit se comble progressivement la nuit et se transforme même en un excédent de vapeur d'eau (IHU) en fin de nuit, pour les deux stations.

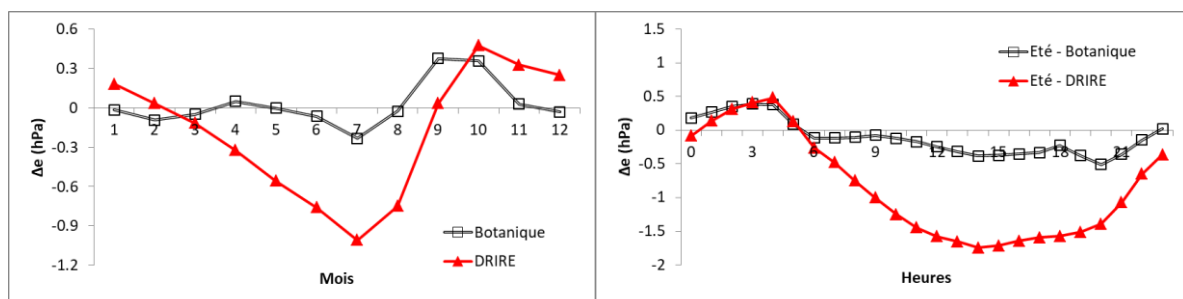


Figure 3. Evolution de la différence de vapeur d'eau (Δe) obtenue par rapport à la référence rurale pour deux stations urbaines à Strasbourg pendant la période 2011-2018. A gauche l'évolution mensuelle et à droite l'évolution horaire pour la saison d'été uniquement.

Les écarts observés dans les Δe mensuels et horaires prouvent l'existence de phénomènes d'ISU/IHU intenses à certains moments si on se réfère aux critères adoptés par Kuttler *et al.* (2007).

Les deux stations urbaines alternent entre un ISU faible à fort la moitié du temps (50,4 % et 52,7 % respectivement pour Botanique et DRIRE) et un IHU le reste du temps (Tableau 1). L'îlot de sécheresse urbain n'est donc plus le phénomène dominant comme c'était le cas pour l'humidité relative. On observe même que les IHU forts ($\Delta e > 0,5$ hPa) obtiennent des fréquences non négligeables dans les deux stations : 21,3 % pour Botanique et 20,3 % pour DRIRE (Tableau 1). Comme l'IHU (de faible à fort) est un phénomène qui survient essentiellement en période froide et nocturne (Figure 4), l'évapotranspiration joue peu sur sa formation qui est essentiellement due au maintien de la bonne capacité hygrométrique de l'air en ville, du fait de l'existence de l'îlot de chaleur urbain. En outre, le phénomène d'IHU fort est marqué par une fréquence d'apparition singulière en octobre.

Tableau 1. Fréquences d'apparition de la différence de vapeur d'eau (Δe) obtenue par rapport à la référence rurale pour les stations urbaines DRIRE et Botanique, par classe d'intensité, sur la période 2011-2018.

	$\Delta e < -0,5$ hPa (fort ISU)	$-0,5 \leq \Delta e < 0$ hPa (faible ISU)	$0 \leq \Delta e \leq 0,5$ hPa (faible IHU)	$\Delta e > 0,5$ hPa (fort IHU)
Botanique (%)	18,7	31,7	28,3	21,3
DRIRE (%)	28,3	24,4	27,0	20,3

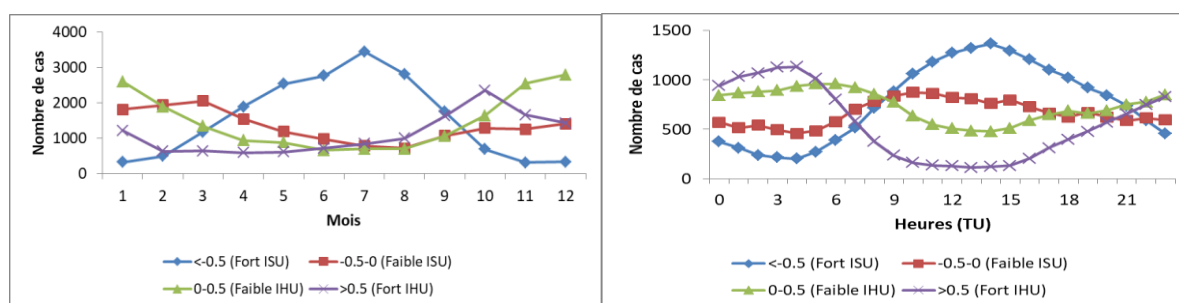


Figure 4. Fréquence d'apparition mensuelle (gauche) et horaire (droite) des classes d'intensité de Δe pour le site de la DRIRE pour la période 2011-2018.

Les ISU intenses ($\Delta e < -0,5$ hPa) ont une fréquence de 28,3 % pour DRIRE (Tableau 1) et 18,7 % pour Botanique. Il s'agit d'un phénomène essentiellement diurne et de saison chaude (Figure 4). Cette différence de fréquence entre DRIRE et Botanique est beaucoup plus significative dans le cas de l'ISU intense que dans celui de l'IHU intense, ce qui prouve bien le rôle fondamental que joue la végétation en ville pour limiter les ISU : cette différence de fréquence est la conséquence directe de l'évapotranspiration qui se produit dans le parc et y atténue les ISU.

Conclusions et synthèse

Du point de vue de l'humidité relative, la ville forme un îlot de sécheresse (ISU) quasi permanent mais dont l'intensité baisse dans les parcs et varie selon l'îlot de chaleur. Ces deux facteurs constituent des leviers sur lesquels il est possible de jouer pour moduler l'intensité de l'ISU. En de rares occasions, la ville se transforme en un îlot d'humidité (IHU) en même temps qu'un îlot de fraîcheur (configuration couplée). Ce couplage se produit surtout au cours des mois de septembre et octobre. En ce qui concerne la vapeur d'eau, le temps se partage beaucoup plus équitablement entre ISU et IHU. L'ISU de vapeur est un phénomène qui se

produit pendant la saison chaude et le jour, tandis que l'IHU de vapeur est plutôt présent en pendant la saison froide et la nuit. L'îlot de sécheresse urbain est provoqué par l'intense évapotranspiration en zone rurale qui contraste avec la faiblesse des émissions de vapeur de la ville, surtout dans les zones les plus artificialisées : la présence d'un parc permet d'atténuer considérablement l'intensité des ISU. L'îlot d'humidité quant à lui, doit sa formation essentiellement à la bonne capacité hygrométrique de l'air en ville en hiver ou la nuit du fait de l'îlot de chaleur, alors que simultanément, à la campagne, les basses températures provoquent le départ de la vapeur par dépôt de rosée. Cet IHU de vapeur obtient une fréquence d'apparition inhabituelle au mois d'octobre tout comme pour l'IHU d'humidité relative. Les deux phénomènes sont donc concomitants.

Remerciement : Ce travail de recherche a été mené dans le cadre du projet COOLTREES (2017-2020) financé par l'ANR.

Bibliographie

- Kopec, R.J., 1973. Daily spatial and secular variations of atmospheric humidity in a small city. *Journal of Applied Meteorology*, **12**, 639-648.
- Ackerman, B., 1987. Climatology of Chicago area urban-rural differences in humidity. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, **26**, 427-430.
- Chandler, T.J., 1967. Absolute and relative humidities in Towns. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **48**, 394-399.
- Charciarek, T., 2003. Daily course of vapour pressure and relative humidity differences between urban and rural site in Lodz. *5th international conference on urban climate, Lodz, Pologne*, **1**, 51-54.
- Kuttler, W., Weber, S., Schonnefeld, J., & Hesselschwerdt, A., 2007. Urban/rural atmospheric water vapour pressure differences and urban moisture excess in Krefeld, Germany. *International Journal of Climatology*, **27**, 2005-2015.
- Lee, D.O., 1991. Urban-rural humidity differences in London. *International Journal of Climatology*, **11**, 577-582.
- Montauban, O., 2019. Une approche vectorielle pour classifier des données images et vecteurs dans le but d'extraire une cartographie des zones climatiques locales des quartiers de Strasbourg. *Mémoire de projet de fin d'études*, 90 p.
- Richards, K., 2005. Urban and rural dewfall, surface moisture, and associated canopy-level air temperature and humidity measurements for Vancouver, Canada. *Boundary-Layer Meteorology*, **114**, 143-163.
- Stewart, I., & Oke, T., 2012. Local climate zones for urban temperature studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **93**, 1879-1900.
- Unger, J., 1999. Urban-rural humidity differences in Szeged, Hungary. *International Journal of Climatology*, **19**, 1509-1515.