

Suivi expérimental du continuum hydrique sol-arbre-atmosphère en milieu urbain : une approche intégrée hydrologique, thermique et écologique

Experimental monitoring of the soil-tree-atmosphere water continuum in urban environments: an integrated hydrological, thermal, and ecological approach

Ilane CHERIF^{1, 2, 3}, Jérémie BONNEAU², Lucie MERLIER¹, Antoine VERNAY³, Frédéric LEFÈVRE¹

¹ CETHIL – Centre d'énergétique et de thermique de Lyon, INSA Lyon
ilane.cherif@insa-lyon.fr ; frederic.lefevre@insa-lyon.fr ; lucie.merlier@insa-lyon.fr

² DEEP – Déchets Eaux Environnement Pollution, INSA Lyon
jeremie.bonneau@insa-lyon.fr

³ LEHNA – Laboratoire d'Écologie des Hydrosystèmes Naturels et Anthropisés, Université Claude Bernard Lyon 1
antoine.vernay@univ-lyon1.fr

RÉSUMÉ

Les Solutions fondées sur la Nature (SfN) sont de plus en plus valorisée dans les politiques publiques, notamment pour améliorer la qualité de vie des citoyens, augmenter l'attractivité, s'adapter au changement climatique en réduisant la surchauffe et en améliorant la gestion des eaux pluviales, et bien sûr, préserver et restaurer la biodiversité. Une solution repose sur le développement d'espaces arborés en ville, mais il est important d'évaluer la performance effective de ces solutions. Pour répondre à cet objectif, un site d'étude expérimental situé sur le campus de la Doua (Villeurbanne, France) a été instrumenté. Il s'agit à travers des études expérimentales et théoriques de mieux comprendre comment les conditions microclimatiques urbaines influencent le fonctionnement d'un arbre par des mesures écophysiological, des mesures microclimatologiques, et des mesures hydriques au niveau des sols. Ce travail présente les premières mesures obtenues sur ce site en 2025 et les perspectives pour les années à venir.

ABSTRACT

Nature-based solutions (NbS) are increasingly valued in public policy, particularly for improving citizens' quality of life, enhancing attractiveness, adapting to climate change by reducing overheating and improving stormwater management, and, of course, preserving and restoring biodiversity. One solution is based on the development of tree-lined areas in cities, but it is important to evaluate the actual performance of these solutions. To meet this objective, an experimental study site located on the Doua campus (Villeurbanne, France) has been set up. Through experimental and theoretical studies, the aim is to better understand how urban microclimatic conditions influence tree functioning through ecophysiological measurements, microclimatological measurements, and soil moisture measurements. This work presents the first measurements obtained at this site in 2025 and the prospects for the coming years.

MOTS CLÉS

ecophysiology, sap flow, urban microclimate, urban trees, water stress.

1 INTRODUCTION

Les espaces urbains constituent des espaces fortement artificialisés, sujets aux surchauffes, et pouvant être soumis à une pression sur la ressource en eau. La désimperméabilisation et la revégétalisation des villes font partie des Solutions fondées sur la Nature (SfN) permettant d'atténuer certains effets néfastes de cette artificialisation pour les habitants (Carlyle-Moses et al., 2020). Les arbres sont ainsi de plus en plus intégrés dans l'aménagement urbain pour les services écosystémiques qu'ils apportent (ombrage, rafraîchissement de l'air via la transpiration, captation du carbone, gestion des eaux pluviales, recharge des nappes, etc.) (Lüttge & Buckeridge, 2023). Toutefois, ils sont soumis à des contraintes environnementales fortes (îlot de chaleur urbain, rayonnement réfléchi par le bâti, pollution, faible profondeur et surface de sol, etc.) qui peuvent réduire leurs performances et les services associés (Haase & Hellwig, 2022). Si le potentiel des arbres en ville représente une SfN prometteuse (Mantova et al., 2024), les études quantifiant l'impact des stress thermique et hydrique sur leur fonctionnement en environnement urbain restent limitées (Percival, 2023). Cette communication aborde ces enjeux à travers l'étude de la réponse de plusieurs espèces d'arbres face aux stress hydrique et thermique imposés par le contexte urbain, et l'impact sur la qualité des services écosystémiques rendus. La première étape de ce travail a porté sur l'instrumentation d'un site urbain situé sur le campus de la Doua (Villeurbanne, France) pour identifier le fonctionnement de deux tilleuls d'espèces différentes, au cours de leur période de croissance et d'évaluer l'influence des conditions microclimatiques sur ce fonctionnement.

2 MATERIEL ET METHODES

Le parc urbain étudié présenté sur la Figure 1, est entouré par trois résidences universitaires comportant une ouverture au sud. Ce site d'étude est inscrit dans une Zone Climatique Locale qualifiée d'Open Mid-Rise d'après la carte de Lyon produite par Renard & Alonso (2020), ce qui correspond à « une disposition ouverte de bâtiments de hauteur moyenne (3 à 9 étages), marqué par une abondance de couverture végétale perméable (plantes basses, arbres dispersés) et dont les matériaux de construction sont le béton, l'acier, la pierre et le verre » (Stewart & Oke 2012). Le recensement des arbres sur le site indique la présence de 10 tilleuls, 6 cèdres, 3 ormes, 1 charme et 1 merisier. Au sol, le site est subdivisé en 19 zones végétalisées de superficies variables, séparées par des chemins, dont 13 comportent au moins un arbre.



Figure 1 – Arbres suivis en 2025 sur le site d'étude du campus de la Doua (crédit image : 2025 Google, CNES / Airbus, Maxar Technologies)

Pour la première année d'étude, deux tilleuls d'espèces différentes (*Tilia Cordata* et *Tilia Platyphyllos*) ont été sélectionnés au sein d'une même zone végétalisée proche de la résidence ouest (Figure 1) pour effectuer une campagne de mesures. Tout d'abord, ces arbres sont adultes, ils ont donc un métabolisme plus lent et plus stable que des arbres de la même espèce qui auraient été plantés récemment. De plus, leur positionnement présente des caractéristiques hydrologiques et microclimatiques intéressantes, dues à leur partage du même sol (mêmes réserves potentielles en eau), et de leur proximité d'un bâtiment suffisant pour en être influencé (rayonnement solaire partiellement réfléchi en journée et ombrage en fin d'après-midi).

Un nombre conséquent de capteurs est mobilisé sur le site afin de caractériser le continuum hydrique sol-arbre-atmosphère de chaque arbre au sein de la zone d'étude (Figure 2). La transpiration de l'arbre est régie par les gradients de potentiel hydriques entre les différents compartiments du continuum sol-arbre-atmosphère. Ces différences de pression permettent le transport de l'eau des potentiels les plus élevés vers les potentiels les plus faibles. La variation de potentiel hydrique se structure ainsi suit : le potentiel matriciel (dans le sol), la pression au niveau des racines de l'arbre, la pression dans les tissus de l'arbre, le potentiel hydrique au niveau des feuilles, et enfin la pression de vapeur atmosphérique (Taiz & Zeiger, 2002).

L'état hydrique du sol est suivi en trois emplacements à l'aide de six sondes TEROS (METER Group). Quatre profils d'humidité et de température du sol (TEROS 54) sont mesurés à 1 m de l'Arbre 1 et de l'Arbre 2, et entre les deux arbres, dont les troncs sont séparés de 10 m. Ces mesures sont complétées par l'humidité et la température à 5 cm de profondeur entre les arbres (TEROS 11), ainsi que par le potentiel matriciel à 15 cm sous l'Arbre 1 et entre les arbres (TEROS 22). Les données météorologiques utilisées correspondent aux relevés bruts obtenus par l'Observatoire de Terrain en Hydrologie Urbaine¹, sur le toit d'un bâtiment situé à moins de 500 m au Sud-Est du parc étudié. Pour la saison 2026, une station ATMOS 41W (METER Group) sera installée directement sur site pour suivre les paramètres météorologique présentés sur la figure 2 directement dans la zone d'étude. Sur chaque arbre, deux microdendromètres ePepiPIAF (CaptConnect) mesurent la croissance radiale de deux branches d'orientation différentes : Ouest et Est sur l'arbre 1, Nord et Sud sur l'arbre 2. Pour suivre la transpiration de l'arbre 1, un capteur de flux de sève réalisé au laboratoire a été utilisé pour mesurer la vitesse de sève. Enfin, à cela s'ajoutent deux types de mesures ponctuelles du LAI – Leaf Area Index et de la conductance stomatique dont les méthodes de mesure requièrent un opérateur présent sur place, limitant la fréquence d'acquisition de ces données.

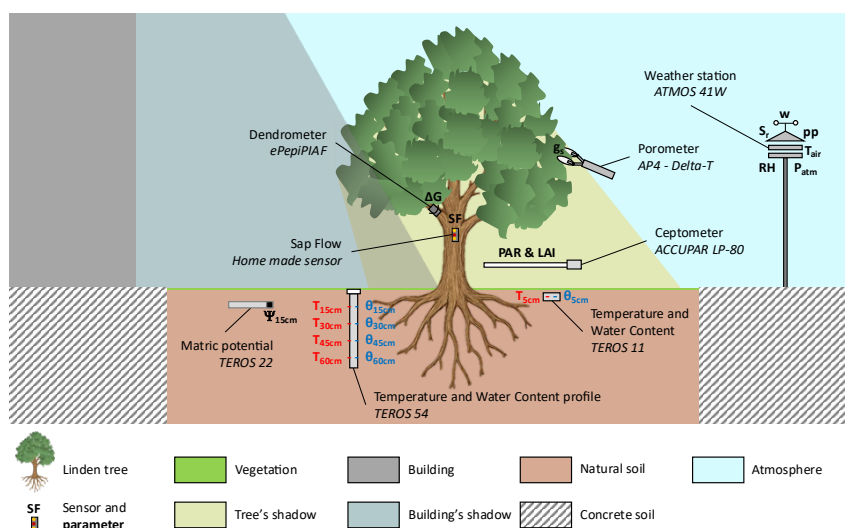


Figure 2 – Suivi du comportement écophysologique d'un arbre et des variables microclimatiques en contexte urbain.

3 EXEMPLE DE RESULTATS ET PERSPECTIVES

La figure 3 montre deux exemples de mesures expérimentales brutes, effectuées sur l'arbre 1 et son environnement au cours d'une semaine de pluie au mois de juin et une semaine ensoleillée au mois de juillet. Le capteur de flux de sève a permis d'obtenir les variations de vitesse de sève brute en deux points *outer* et *inner* situés respectivement à 1,5 cm de 2,5 cm de profondeur sous l'écorce de l'arbre 1. L'analyse de ces données est en cours pour extraire des variables d'intérêt des variables physiques mesurées (débit d'évaporation, VPD, croissance, etc.) et analyser statistiquement les influences croisées entre celles-ci. Une analyse qualitative de ces graphiques permet dans un premier temps d'identifier certains comportements attendus :

- L'interception des précipitations par la canopée est visible en observant l'absence d'augmentation du potentiel matriciel et du contenu en eau lors d'événements pluvieux de faible intensité ;

¹ <https://www.othu.org/>

- La transpiration étant liée à la photosynthèse, les cycles journaliers de flux de sève sont influencés par le rayonnement solaire incident et par la température de l'air ;
- Les données dendrométriques indiquent que la croissance de l'arbre est plus élevée au mois de juin qu'au mois de juillet.

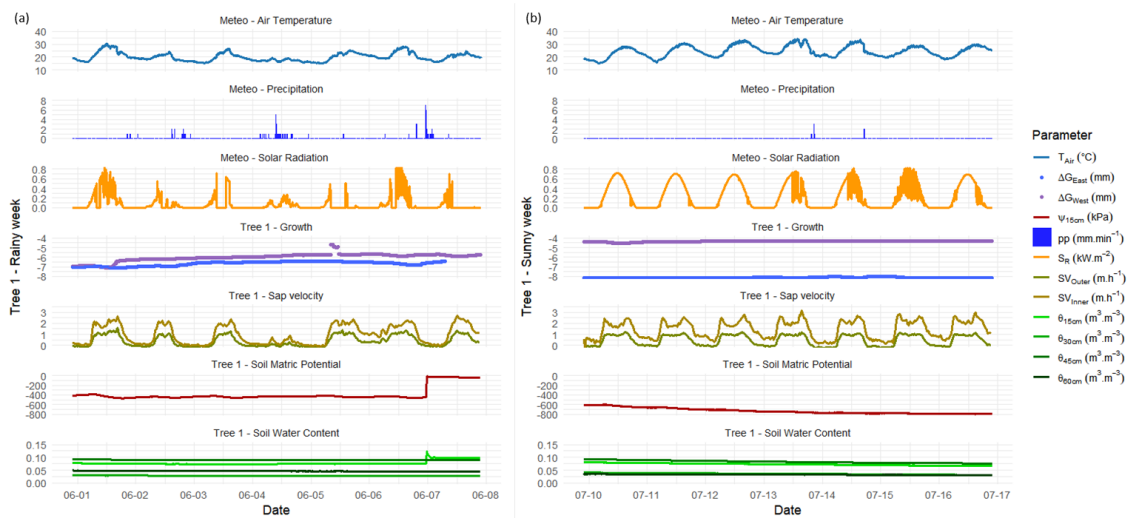


Figure 3 – Exemple de deux séries de données brutes obtenues au cours de la campagne de mesure 2025 pour l'arbre 1 au cours du mois de juin : (a) lors d'une semaine couverte comportant un événement de pluie notable, et (b) lors d'une semaine ensoleillée.

La suite immédiate de ce travail est la mise en place d'un protocole plus ambitieux pour suivre l'ensemble des variables d'influence sur le continuum sol-arbre-atmosphère, en croisant des approches hydrologique, thermique et écologique. Ces travaux visent à mieux modéliser le comportement de l'arbre au sein de son microclimat urbain, à identifier l'impact des conditions climatiques extrêmes sur ce comportement et les conséquences sur la qualité des services écosystémiques rendus.

REMERCIEMENTS

Ce travail de thèse est financé par le Pepr SoluBioD, dans le cadre du projet France 2030 et opéré par l'Agence Nationale de Recherche. La partie expérimentale de ce travail est co-soutenue par la MITI du CNRS dans le cadre du projet *Magic Square*. Nous tenons à remercier le Service Interuniversitaire Domaine de La Doua (SIDD) de permettre le déroulement de cette étude sur l'entièreté du site d'étude. Merci Laurent Morel, HDR au Laboratoire Ampère (UMR 5005) pour son aide au développement d'un capteur de flux de sève.

BIBLIOGRAPHIE

- Carlyle-Moses, D. E., Livesley, S., Baptista, M. D., Thom, J., & Szota, C. (2020). *Urban Trees as Green Infrastructure for Stormwater Mitigation and Use*. In D. F. Levia, D. E. Carlyle-Moses, S. Iida, B. Michalzik, K. Nanko, & A. Tischer (Éds.), *Forest-Water Interactions* (p. 397-432). Springer International Publishing.
- Haase, D., & Hellwig, R. (2022). *Effects of heat and drought stress on the health status of six urban street tree species in Leipzig, Germany*. *Trees, Forests and People*, 8, 100252.
- Lüttge, U., & Buckeridge, M. (2023). *Trees : Structure and function and the challenges of urbanization*. *Trees*, 37(1), 9-16.
- Mantova, M., Johnson, D. M., Antebi, J., Beery, S., Blumstein, M., Cohen, R., Defavari, F., Feng, X., Feuer, E., Gersony, J., Hammond, W. M., John, G., Marchin, R. M., Mau, Y., Miller, B., Nibbelink, C., Ossola, A., Paquette, A., Rademacher, T., ... Preisler, Y. (2024). *Monitoring urban trees across the world : Report from the Urban Trees Ecophysiology Network (UTEN) inaugural workshop*. *New Phytologist*, 242(5), 1881-1885.
- Percival, G. C. (2023). *Heat tolerance of urban trees – A review*. *Urban Forestry & Urban Greening*, 86, 128021.
- Renard, F., Alonso, L. (2020). *Températures de surface et mesures mobiles confrontées aux zones climatiques locales : exemples des agglomérations de Tokyo et de Lyon*. *Climatologie*, 17 (11).
- Stewart, I. D., & Oke, T. R. (2012). *Local Climate Zones for Urban Temperature Studies*. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93, 1879-1900.
- Taiz, L. and Zeiger, E. (2002). *Plant Physiology*. 3rd Edition, Sinauer Associates Inc., Sunderland, 63.