Développement d'un dispositif miniaturisé et autonome pour la mesure du flux de sève des arbres

Marie Fournier – Didier Moullet – Pascal Boivin

Les arbres fournissent au milieu urbain de multiples services tels que la réduction des îlots de chaleur (Gillner *et al.*, 2013), la gestion des eaux pluviales (Berland *et al.*, 2017), la réduction de la pollution chimique et sonore (Klingberg *et al.*, 2017), sans oublier leurs effets sur la santé et le sentiment de bien-être (Nesbitt *et al.*, 2017). Or, ces bénéfices ne sont réels que dans le cas où les arbres sont en situation de confort (Leuzinger *et al.*, 2010), phénomène encore rare dans nos villes. En effet, les conditions de développement de l'arbre urbain sont rudes ; l'augmentation incessante de l'imperméabilisation des sols, leur compaction, leur pollution par les métaux lourds, pesticides ou sels, altèrent la fertilité des sols (Peters *et al.*, 2010). Les fosses de plantation sont confinées (le volume minimal est fixé à 9 m^3 selon les directives genevoises, 2013), et les arbres sont confrontés à de multiples dommages mécaniques qui peuvent faciliter la colonisation par des pathogènes. Enfin, ils sont trop souvent considérés comme du mobilier urbain, changeant au rythme des modifications des plans d'aménagements. Toutes ces contraintes réduisent de plus de moitié la durée de vie des arbres en milieu urbain estimée aujourd'hui à 40 et 60 ans en moyenne pour Suisse et France respectivement (Gillig *et al.*, 2008).

La connaissance de la transpiration des arbres en ville est un outil de réflexion sur les aménagements urbains (Rahman *et al.*, 2015). À l'heure de la préoccupation des changements climatiques, elle permet notamment d'apprécier leur potentiel en termes de services écosystémiques, ou d'évaluer leur bon fonctionnement. Malheureusement, peu d'études sont encore réalisées sur le sujet (Kjelgren et Montague, 1998 ; Pataki *et al.*, 2011 ; Rahman *et al.*, 2017a, 2017b, 2015) et la quantification de la transpiration des arbres en ville reste à documenter.

Il existe aujourd'hui diverses méthodes de mesures de transpiration, par conductance stomatique (Scholander *et al.*, 1965) ou encore par bilan de chaleur (Smith et Allen, 1996). L'une des méthodes les plus répandues est la mesure de flux de sève par dissipation thermique (TDP, pour *thermal dissipation probe*) proposée par Granier (1985). Cette dernière est déduite de la dissipation de chaleur mesurée entre deux sondes, séparées de 40 mm et radialement insérées dans le bois d'aubier. La sonde supérieure est chauffée à température constante et la sonde inférieure sert de température de référence (température interne du tronc). À flux nul, la différence de température entre les deux sondes est à son maximum (environ 10 °C). À l'inverse, lorsqu'il y a un flux, la température entre les deux sondes diminue de par la dissipation de chaleur de la sonde supérieure.

Des sondes de longueur variant de 10 à 100 mm (TDP 10-100) sont utilisées en fonction du diamètre de l'arbre étudié. Ces sondes sont reliées au matériel d'enregistrement (*datalogger*) par des câbles de 3 à 30 mètres de longueur. Le chauffage nécessaire à la mesure est très gourmand

en énergie et requiert une tension de 220 volts, ce qui implique la circulation de câbles depuis la source vers les sondes et le *datalogger*.

En milieu urbain, équiper plusieurs arbres contigus suppose donc de faire courir des câbles (souterrain ou aérien) notamment en 220 V, ce qui n'est ni simple ni sûr. Ceci entraîne en outre de vives réactions de la population qui ne comprend ni n'accepte ces équipements trop visibles. Des problèmes de vandalisme sont rapportés (Rahman *et al.*, 2017a). Or un grand nombre de mesures est nécessaire pour établir des valeurs de transpiration pour une essence donnée, et ces contraintes d'installation sont donc limitantes.

Pour répondre à cette problématique, un nouveau système d'enregistrement et d'alimentation, individuel (par arbre) et totalement discret a été mis au point à partir du système TDP (Dynamax©).

CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES

Le principe retenu est de miniaturiser un système d'acquisition individuel par arbre avec une alimentation autonome sur batterie (y compris le chauffage) et l'insertion du tout dans un nichoir à oiseau (photo 1, ci-dessous).

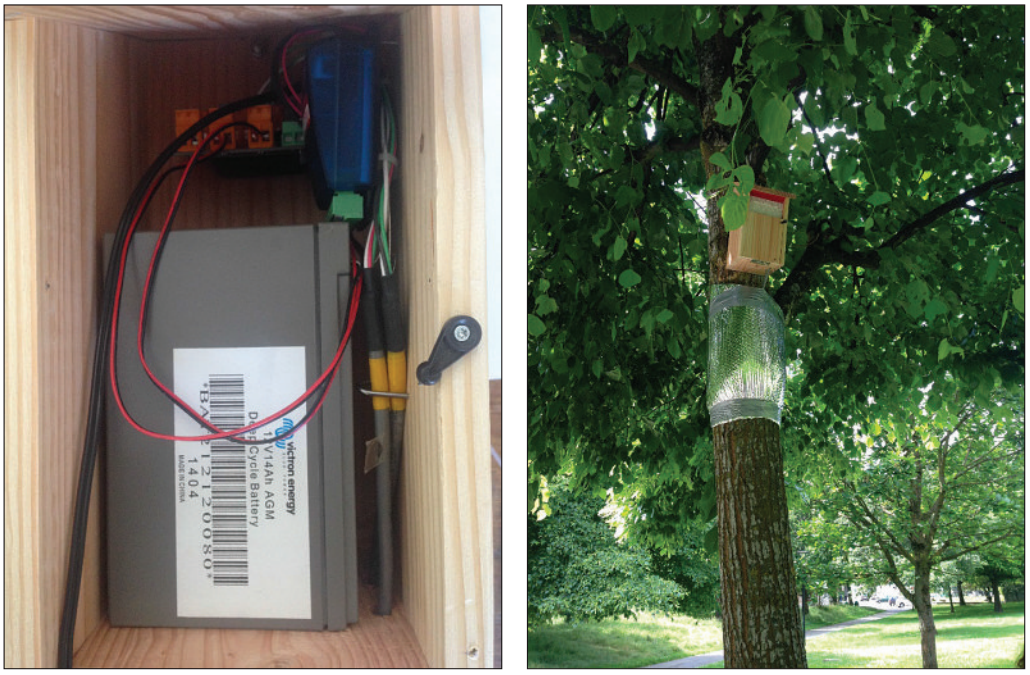


Photo 1 Système miniaturisé de mesure de flux de sève

Le système réalisé est composé d'une carte électronique constituée de :

— une unité de mesure de flux et mise en forme des signaux,

— un système de chauffage des sondes, un système de protection de la batterie,

— un système de communication à distance (*bluetooth*), une carte SD qui mémorise les données (photo 2, p. 9).

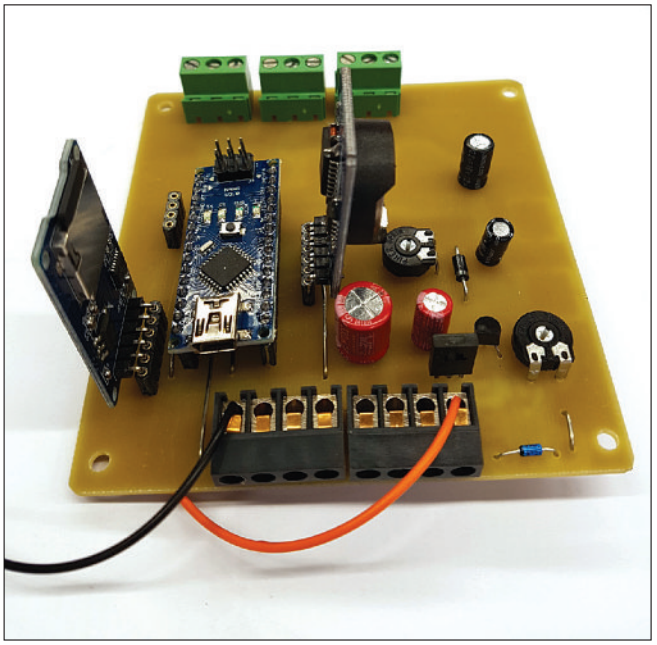


Photo 2 *Datalogger* miniaturisé pour mesure de flux de sève

Le système a été développé pour accueillir un maximum de trois sondes (TDP 10-100). Le choix de la sonde déterminera le réglage du voltage (tableau I, ci-dessous) et l'apport d'énergie nécessaire (type de batterie). Une batterie 12 V-14 Ah AGM permet d'alimenter en continu 2 sondes TDP 30 durant 7 jours.

Tableau I **Spécifications des sondes TDP selon leur taille (Dynamax©)**

Longueur TDP (mm)	Puissance (Watt)	Tension (V)
10	0,08-0,12	2
30	0,15-0,2	3
50	0,32	5
80	0,5	7,5
100	0,44	8

Les dimensions de la carte sont de 100 × 94 mm. Le réglage de la tension de la sonde (chauffage) se fait manuellement par un potentiomètre. Ceci permet une plus grande flexibilité d'utilisation de différentes longueurs de sondes. Le système de protection de la batterie permet de stopper les mesures dès que cette dernière atteint un niveau critique de 10,5 V.

Le tout est orchestré par une carte de type Arduino nano® qui gère :

— la mémorisation des valeurs sur la carte SD de 2 GB (bus I2C sur Arduino) ;

— la carte RTC (*real time clock*) qui permet de connaître le jour et l'heure de la mesure (bus SPI sur Arduino) ;

— la carte *bluetooth* (bus série sur Arduino, non présente sur la figure 2, p. 11) pour l'échange d'informations à distance.

Une application sur Android (*MIT app Inventor*) a été développée pour pouvoir télécharger les valeurs mémorisées dans la carte SD. Par la suite, il est prévu de connecter ce système sur le réseau LoRaWan pour obtenir les valeurs directement sur une page web.

VALIDATION

Le principe de mesure est identique au système conventionnel. Nous présentons ici un test réalisé du 3 au 7 mai 2015 dans la commune du Grand-Saconnex à Genève sur un specimen de *Tilia cordata* planté en pleine terre et disposant d'une bonne alimentation en eau. Le spécimen a une circonférence de 40 cm à un mètre de hauteur. Durant la période testée, la température moyenne fut de 14,8 °C, l'humidité relative de 82,4 %, et la somme des précipitations a été de 13,8 mm.

Deux sondes TDP 30 ont été installées : une située au sud (S) et l'autre au nord (N). Les 3 et 4 mai, l'enregistrement a été assuré par un *datalogger* Campbell CR1000 (C), avec alimentation électrique 220 V (3 et 4 mai 2017, figure 1, ci-dessous, lignes pleines). La sonde N a ensuite été connectée au boîtier miniaturisé (P) équipé d'une batterie AGM 12 V (du 4 au 7 mai 2017, figure 2, p. 11, ligne pointillée). Les données ont été enregistrées toutes les 5 minutes.

La relation entre le flux mesuré par la sonde S et celui mesuré par la sonde N sur la plage horaire 9 h-19 h n'est pas modifiée par le changement de boîtier de mesure utilisé (figure 2, p. 11). Cette relation est linéaire avec un r^2 de 0,97 avec le boîtier miniaturisé et de 0,98 lorsque les deux sondes sont sur le même boîtier (C). Les pentes et ordonnées à l'origine des relations sont identiques et non significativement différentes de la bissectrice.

Figure 1 **MESURE DU FLUX DE SÈVE [SONDE SUD (S) ET NORD (N)] SUR *TILIA CORDATA* DU 4 AU 7 MAI 2015 AVEC BOÎTIER CONVENTIONNEL (Campbell CR1000 (C), lignes pleines) ET BOÎTIER MINIATURISÉ (P, lignes pointillées)**

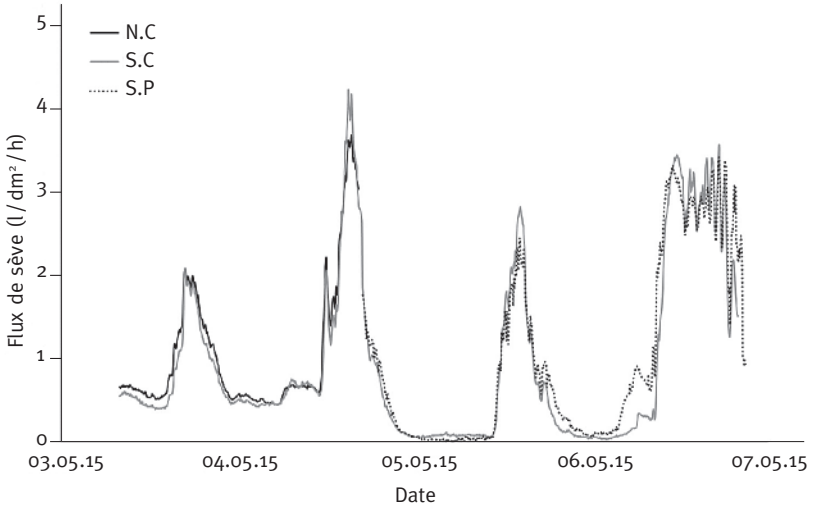
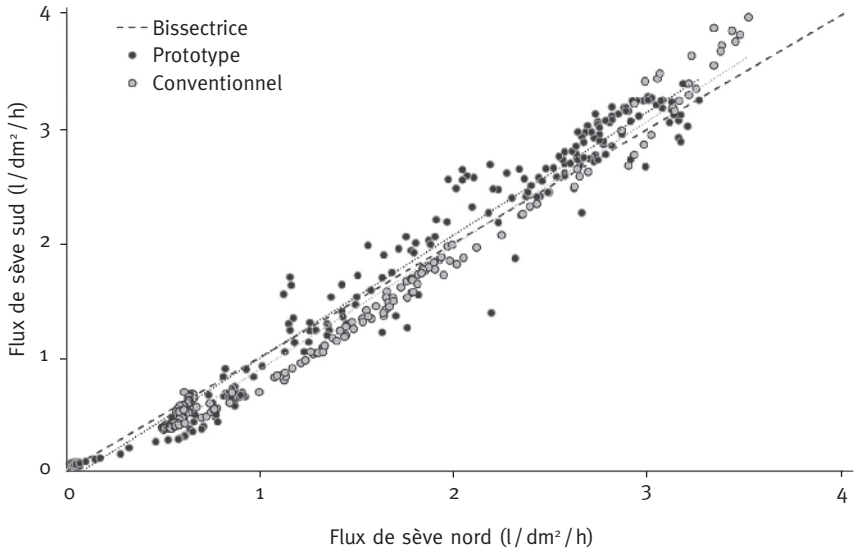


Figure 2 COMPARAISON DES MESURES DE FLUX DE SÈVE ENTRE BOÎTIER CONVENTIONNEL (gris) ET BOÎTIER MINIATURISÉ (noir) DU 4 AU 7 MAI 2015



L'utilisation du système développé ici est donc validée.

De plus, ce système a été utilisé sur 20 arbres dans le canton de Genève sur une durée de 3 ans sans qu'aucune dégradation ou interpellation du public ne survienne. L'objectif de discrétion est donc atteint.

LIMITATIONS ET PERSPECTIVES

La principale limitation reste la consommation électrique des sondes TDP qui sont chauffées en permanence et ont une puissance de 0,2 watt (TDP 30), ce qui nécessite la recharge de la batterie sous 7 jours. Dans notre contexte, une batterie d'une plus grande capacité (22-38 Ah) n'était pas envisageable pour des questions de poids.

Avec une fréquence de deux mesures par heure, un système de chauffage alternatif (15 minutes de chauffage et 15 minutes de pause, 15/15) pourrait permettre de réduire la consommation électrique et de travailler un mois avec une batterie 12 V-14 Ah. Les études de Do et Rocheteau (2002) valident le système alternatif 15/15. Cette option sera donc implémentée prochainement.

CONCLUSIONS

L'étude des arbres en milieu urbain, *via* notamment l'évaluation de la transpiration, est encore peu développée et mérite plus d'attention. Or, dans le milieu urbain, l'agencement des arbres et la réaction du public ne favorisent pas toujours ce type d'étude. En ville, la mesure de la transpiration des arbres doit être facile et discrète.

Le système développé ici vient répondre à ce besoin en créant un boîtier de mesure miniaturisé qui permet l'étude d'arbres isolés, de manière discrète, flexible et économique.

La consommation en énergie des sondes TDP demeure un problème. Un système de chauffage alternatif 15/15 permettra d'améliorer la longévité de la batterie.

Marie FOURNIER
Collaboratrice scientifique
Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture (hepia)
Groupe Sols et Substrats,
Institut Terre-Nature-Environnement
Route de Presinge, 150
CH-1254 JUSSY (SUISSE)
(marie.fournier@hesge.ch)

Didier MOULLET
Maître adjoint
Centre de Formation Professionnel Technique (CFPT)
École d'électronique
Route du Pont-Butin, 43
CH-1213 PETIT-LANCY (SUISSE)
(didier.moullet@edu.ge.ch)

Pascal BOIVIN
Professeur HES
Responsable du groupe Sols et Substrats
Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture (hepia)
Groupe Sols et Substrats,
Institut Terre-Nature-Environnement
Route de Presinge, 150
CH-1254 JUSSY (SUISSE)
(pascal.boivin@hesge.ch)

BIBLIOGRAPHIE

BERLAND A., SHIFLETT S.A., SHUSTER W.D., GARMESTANI A.S., GODDARD H.C., HERRMANN D.L., HOPTON M.E., 2017. The role of trees in urban stormwater management. *Landscape and Urban Planning*, vol. 162, pp. 167-177.

Directive concernant la plantation et l'entretien des arbres, République et canton de Genève 2013. [En ligne] disponible sur : ge.ch/nature/media/nature

DO F., ROCHETEAU A., 2002. Influence of natural temperature gradients on measurements of xylem sap flow with thermal dissipation probes. 2. Advantages and calibration of a non continuous heating system. *Tree Physiology*, vol. 22, pp. 649-654.

GRANIER A., 1985. Une nouvelle méthode pour la mesure du flux de sève brute dans le tronc des arbres. *Annals of Forest Science*, vol. 42, pp. 193-200.

GILLIG C.M., BOURGERY C., AMANN N., 2008. L'Arbre en milieu urbain ; conception et réalisation de plantation. Infolio ed. 216 p.

GILLNER S., VOGT J., THARANG A., DETTMANN S., ROLOFF A., 2015. Role of Street Trees in Mitigating Effects of Heat and Drought at Highly Sealed Urban Sites. *Landscape and Urban Planning*, vol. 143, pp. 33-42.

KJELGREN R., MONTAGUE T., 1998. Urban tree transpiration over turf and asphalt surfaces. *Atmospheric Environment*, vol. 32, pp. 35-41.

KLINGBERG J., BROBERG M., STRANDBERG B., THORSSON P., PLEIJEL H., 2017. Influence of urban vegetation on air pollution and noise exposure – A case study in Gothenburg, Sweden. *Science of the Total Environment*, vol. 599-600, pp. 1728-1739.

LEUZINGER S., VOGT R., KÖRNER C., 2010. Tree surface temperature in an urban environment. *Agricultural and Forest Meteorology*, n° 150, pp. 56-62.

LIVESLEY S.J., MCPHERSON G.M., CALFAPIETRA C., 2016. The Urban Forest and Ecosystem Services: Impacts on Urban Water, Heat, and Pollution Cycles at the Tree, Street, and City Scale. *Journal of Environment Quality*, vol. 45, p. 119.

NESBITT L., HOTTE N., BARRON S., COWAN J., SHEPPARD S.R.J., 2017. The Social and Economic Value of Cultural Ecosystem Services Provided by Urban Forests in North America: A Review and Suggestions for Future Research. *Urban Forestry & Urban Greening*, vol. 25, pp. 103-111.

PATAKI D., MCCARTHY H., LITVAK E., PINCETL S., 2011. Transpiration of urban forests in the Los Angeles metropolitan area. *Ecological Applications*, vol. 21, pp. 661-677.

PETERS E.B., MCFADDEN J.P., MONTGOMERY R.A., 2010. Biological and environmental controls on tree transpiration in a suburban landscape. *Journal of Geophysical Research*, vol. 115.

RAHMAN M.A., ARMSON D., ENNOS A.R., 2015. A comparison of the growth and cooling effectiveness of five commonly planted urban tree species. *Urban Ecosystems*, vol. 18, pp. 371-389.

RAHMAN M.A., MOSER A., RÖTZER T., PAULEIT S., 2017a. Within canopy temperature differences and cooling ability of *Tilia cordata* trees grown in urban conditions. *Building and Environment*, vol. 114, pp. 118-128.

RAHMAN M.A., MOSER A., RÖTZER T., PAULEIT S., 2017b. Microclimatic differences and their influence on transpirational cooling of *Tilia cordata* in two contrasting street canyons in Munich, Germany. *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 232, pp. 443-456.

SMITH D.M., ALLEN S.J., 1996. Measurement of sap flow in plant stems. *Journal of Experimental Botany*, vol. 47, pp. 1833-1844.

SCHOLANDER P.F., BRADSTREET E.D., HEMMINGSEN E.A, HAMMEL H.T., 1965. Sap pressure in Vascular Plants. *Science,* vol. 148, pp. 338-346.

DÉVELOPPEMENT D'UN DISPOSITIF MINIATURISÉ ET AUTONOME POUR LA MESURE DU FLUX DE SÈVE DES ARBRES (Résumé)

La connaissance de la transpiration des arbres urbains est nécessaire à la bonne gestion des plantations, mais est insuffisamment documentée. La méthode de mesure du flux de sève par dissipation thermique (TDP) proposée par Granier (1985) est l'une des plus répandues mais son utilisation reste difficile en milieu urbain. En effet, le matériel est coûteux et encombrant. Sa visibilité suscite de vives réactions des riverains et le rend vulnérable au vandalisme. Pour répondre à ce problème tout en permettant de multiplier les mesures, un boîtier miniaturisé permettant la mesure de flux de sève de façon discrète, autonome et sans câblage apparent a été développé. Le boîtier est adaptable à toutes les sondes TDP (10-100 mm). L'autonomie énergétique, bien que limitée à une semaine, est suffisante pour un suivi. Le système a été testé et validé. Il permet d'envisager une multiplication des mesures en milieu urbain.

DEVELOPMENT OF A MINIATURIZED, STAND-ALONE DEVICE FOR MEASURING SAP FLOW ON TREES (Abstract)

Knowledge about urban tree transpiration is necessary for proper plantation management. However, it is still insufficiently documented. Granier's method (1985), using the Thermal Dissipation Probe (TDP) to measure sap flow, is one of the most widespread techniques. However, its use is not optimal in an urban environment because it involves expensive, bulky equipment that draws attention, making it prone to negative reactions from residents and vulnerable to vandalism. To solve this problem, a miniaturized datalogger has been developed. It is an unobtrusive, self-contained device that records urban sap flow measurements without visible wiring. The housing can accommodate all sizes of TDPs (10-100 mm long). Although the battery charge lasts only one week, this is sufficient for monitoring. The system has been tested and validated opening the way to large-scale measurements in urban environments.