

LA TRANSPIRATION DES ARBRES EN VILLE

MESURE DU FLUX DE SÈVE ET UTILISATION DE L'ÉQUATION DE PENMAN-MONTEITH



Laboratoire Sol et Substrats
Marie Fournier, Véronique Guiné, Lionel Chabbey et Pascal
Boivin
hepia, Genève

Préambule

Cette étude a été réalisée par Marie Fournier (hepia, site Lullier, laboratoire sols et substrats) pour l'obtention d'une maîtrise universitaire en physiologie et écologie des plantes (Université de Neuchâtel). Elle a été prolongée de façon à établir un bilan annuel complet de transpiration des arbres sur la plaine de Plainpalais. La totalité de ce travail a été encadré par l'équipe du laboratoire Sols et Substrats de hepia en particulier Pr. Pascal Boivin, Dr. Véronique Guiné et Lionel Chabbey.

Le projet a été soutenu financièrement par le Service des Espaces Verts de la ville de Genève (SEVE), la Direction Générale de la Nature et du Paysage (DGNP) et hepia (InTNE).

Les résultats obtenus suite à cette étude seront repris dans une publication scientifique soumise prochainement.

Résumé de l'étude

Une plantation urbaine de quatre ans a été étudiée en ville de Genève (Plainpalais) dans le but de caractériser : (1) la transpiration des arbres, (2) leur besoin en eau et (3), l'influence de différents facteurs environnementaux sur le flux de sève. L'objectif étant de comprendre le comportement des arbres vis-à-vis de leur environnement afin d'approfondir les connaissances sur les plantations urbaines et en particulier leurs réponses physiologiques aux stress urbains.

Le flux de sève brute a été mesuré en continu par dissipation de chaleur (sondes Granier), sur une année complète (juin 2013 – mai 2014). Quatre arbres d'essences différentes ont été étudiés : *Tilia cordata*, *Ulmus carpinifolia*, *Celtis australis* et *Prunus avium 'plena'*. L'état hydrique du sol a été suivi grâce à l'utilisation de sondes Watermark. Les données climatiques : rayonnement solaire, température, humidité relative, vitesse du vent et précipitations ont été mesurés par une station météo (Campbell) sur le site d'étude. Ces mêmes données ont été utilisées pour déterminer la transpiration des arbres suivant l'équation modifiée de Penman-Monteith selon la Food and Agricultural Organisation (FAO).

Les principaux résultats présentent une moyenne de transpiration journalière variant de 30 à 80 litres/j suivant l'essence et les conditions environnementales. En période d'eau disponible dans le sol, les mesures de flux de sève correspondent aux valeurs proposées par l'équation modifiée de la FAO Penman-Monteith ($r^2 : 0.8$). La comparaison entre les deux approches offre une meilleure compréhension du comportement des arbres. Deux facteurs environnementaux présentent une influence majeure sur le flux de sève : les radiations solaires et le déficit de pression de vapeur (estimé à partir de l'humidité relative et la température ambiante). L'absence de relation entre l'équation de Penman-Monteith et les mesures de flux de sève permet de mettre en évidence différents stress, dont un stress hydrique (identifié par les sondes Watermark).

Cette étude a un caractère préliminaire pour ce qui est d'établir des valeurs de transpirations dans le sens où les mesures doivent être multipliées sur de nombreux spécimens d'âge et de situations différentes pour obtenir des données généralisables.

Mots clefs :

Flux de sève, méthode Granier par dissipation de chaleur, transpiration urbaine, équation de FAO Penman-Monteith, arbre en milieu urbain, *Celtis australis*, *Prunus avium plena*, *Tilia cordata*, *Ulmus carpinifolia*

Table des matières

Préambule	I
Résumé de l'étude.....	II
Mots clefs :	II
1. Introduction.....	1
2. Matériels et Méthodes	2
2.1 Plantation Urbaine	2
2.2 Etude de la transpiration.....	6
2.2.1 Mesure de flux de sève	6
2.2.2 Détermination de la zone conductrice par impédance électrique	8
2.2.3 Penman-Monteith	8
2.3 Suivi de l'état hydrique du sol.....	9
2.4 Etude des facteurs environnementaux.....	10
3. Résultats et Discussion	11
3.1 Transpiration selon la mesure du flux de sève.....	11
3.1.1 Cycle journalier de la vitesse de flux	11
3.1.2 Détermination de la zone conductrice	12
3.1.3 Transpiration des arbres.....	16
3.2 Transpiration selon l'équation de FAO Penman-Monteith	17
3.2.1 Mesure du potentiel matriciel dans les fosses de plantation.....	18
3.2.2 Détermination de l'indice foliaire	19
3.3 Variation du flux de sève en période de stress hydrique	21
3.4 Conclusion partielle	26
3.5 Influence des paramètres environnementaux	27
3.5.1 Régression linéaire multiple	28
3.5.2 Equations de régressions	28
3.5.3 Prédications de Penman <i>versus</i> équations de régression	29
3.6 Descente du flux de sève	31
3.7 Montée de Sève	35
4. Discussion Générale	43
4.1 Penman-Monteith	43
4.2 Méthode du flux de sève et évaluation de la transpiration	43
4.3 Suivi de l'état hydrique du sol.....	44
4.4 Influence des paramètres environnementaux	45
4.5 Bilan annuel : Descente et montée de sève.....	45
5. Conclusions et perspectives.....	47
Références bibliographiques	49

1. Introduction

Les arbres urbains font partie intégrante du concept de nature en ville. Ils contribuent au sentiment de bien-être de la population, ont une influence positive et sont généralement considérés comme source de santé mentale et physique (Manusset 2012). Leurs fonctions esthétiques et paysagères sont primordiales et permettent de créer un cadre agréable en mettant en valeur bâtiments, vues et perspectives (Gillig et al. 2008).

En plus de leur impact social, les arbres ont une influence sur le microclimat urbain. Ils purifient l'air en produisant de l'oxygène et en participant à la réduction du taux de gaz polluants. Le phénomène de transpiration rafraîchit l'air ambiant (augmentation de l'humidité de l'air et abaissement de la température), permettant ainsi de réguler les îlots de chaleur que sont les villes (Konopacki and Akbari 2001).

Les arbres représentent également un habitat (refuge, lieu de reproduction ou/et réserve de nourriture) pour différentes espèces animales et végétales favorisant ainsi le maintien d'une biodiversité et d'un écosystème urbain (Guinaudeau, 2010).

Les arbres urbains doivent néanmoins faire face à de nombreuses contraintes liées à la ville :

- leurs fosses de plantations sont confinées (minimum de 9m³), le sol est souvent trouvé compacté, imperméable et parfois pollué (métaux lourds, pesticides, sels) (Gillig et al. 2008)
- ils sont confrontés à de multiples dommages mécaniques qui facilitent l'entrée de virus, bactéries et autres pathogènes.
- enfin, ils sont parfois, à tort considérés comme du mobilier urbain, changeant au rythme des modifications des plans d'aménagement.

Toutes ces contraintes et ces agressions réduisent d'autant plus la durée de vie des arbres en milieu urbain.

L'importance de l'arbre en ville, tant du point de vue environnemental que social, n'est plus à prouver. Mais il devient essentiel de mieux comprendre le fonctionnement des plantations urbaines de façon à développer des projets de plantations durables et ainsi assurer une bonne reprise et une meilleure implantation des arbres dans ces milieux restrictifs.

Les objectifs de cette étude sont de proposer et de compiler un suivi :

- ✓ de la transpiration des arbres,
- ✓ de leur consommation en eau,
- ✓ des différents facteurs environnementaux influençant leur transpiration,
- ✓ de la descente et de la montée de sève (automne et printemps).

Cette étude propose pour la première fois une approche intégrant le sol, l'arbre ainsi que son environnement climatique. Le couplage des données de ces différents volets permettra une meilleure compréhension du comportement de l'arbre en milieu urbain.

2. Matériels et Méthodes

2.1 Plantation Urbaine

Cette étude a été menée sur une année complète, de juin 2013 à mai 2014 sur la Plaine de Plainpalais, à Genève. Quatre arbres d'essences différentes ont été étudiés (Tableau 1 et Figure 2) :

- *Tilia cordata*
- *Ulmus carpinifolia*
- *Celtis australis*
- *Prunus avium 'plena'*

Les arbres ont été plantés en avril 2010, lors de la seconde phase des travaux de renouvellement des arbres de la plaine. Les arbres ont été arrosés jusqu'en octobre 2012. La plantation est désormais considérée comme autonome et dépend uniquement des conditions naturelles (précipitations et réserves en eau du sous-sol). Le rapport annuel du suivi de cette plantation (hepia, laboratoire sols et substrats, 2012) indique que l'enracinement dépasse 80 cm de profondeur depuis la fin de l'été 2010. Les arbres ont cependant bénéficié en 2012 de 11 arrosages (soit 5.3 m³/arbre). Les racines n'atteignaient vraisemblablement pas la nappe phréatique se situant entre 2.5 et 3 mètres de profondeur sous la plaine de Plainpalais.

Les arbres ont été plantés dans des fosses de plantations continues (Figure 3). Ce système permet une plus grande expansion de l'espace racinaire passant d'un minimum de 9m³ à 36m³ par arbre. Le lien entre les fosses est fait d'un mélange terre-pierre créant un squelette résistant à la compaction du sol tout en permettant une certaine colonisation des racines. Les pierres anguleuses (Figure 1) sont favorisées car elles permettent, par leur organisation, de préserver entre elles des espaces plus grands (Rossignol et al. 2007). Les arbres ont été plantés avec 4 m³ de terre végétale. La plantation suit les directives fournies par la DGNP (2013).



Figure 1. Pierres anguleuses utilisées pour le mélange terre-pierre.

Tableau 1. Description des quatre arbres étudiés (Etat des lieux en octobre 2013)

	<i>Tilia cordata</i>	<i>Ulmus carpiniifolia</i>	<i>Celtis australis</i>	<i>Prunus avium</i>
Numéro de plantation	9	14	10	15
Date de plantation	2010	2010	2010	2010
Hauteur de l'arbre [m]	6.5	7.3	6.7	7.4
Hauteur de couronne [m]	3.60	4.49	3.35	4.15
Diamètre de couronne [m]	4.0	5.0	4.8	4.8
Circonférence du tronc à 1 m [cm]	52.5	68.0	58.5	61.5

En plus de leurs essences, les quatre arbres étudiés diffèrent dans leur aspect, hauteur et circonférence (Tableau 1). Ces différences peuvent provenir d'une variabilité *inter* ou/et *intra*-espèce. Les valeurs et résultats présentés ici doivent être pris comme une vision globale du comportement des arbres dans un cadre urbain.



Tilia cordata



Celtis australis



Prunus avium



Ulmus carpiniifolia

Figure 2. Les quatre arbres sélectionnés pour l'étude. Photographie : Plaine de Plainpalais le 26.06.2013

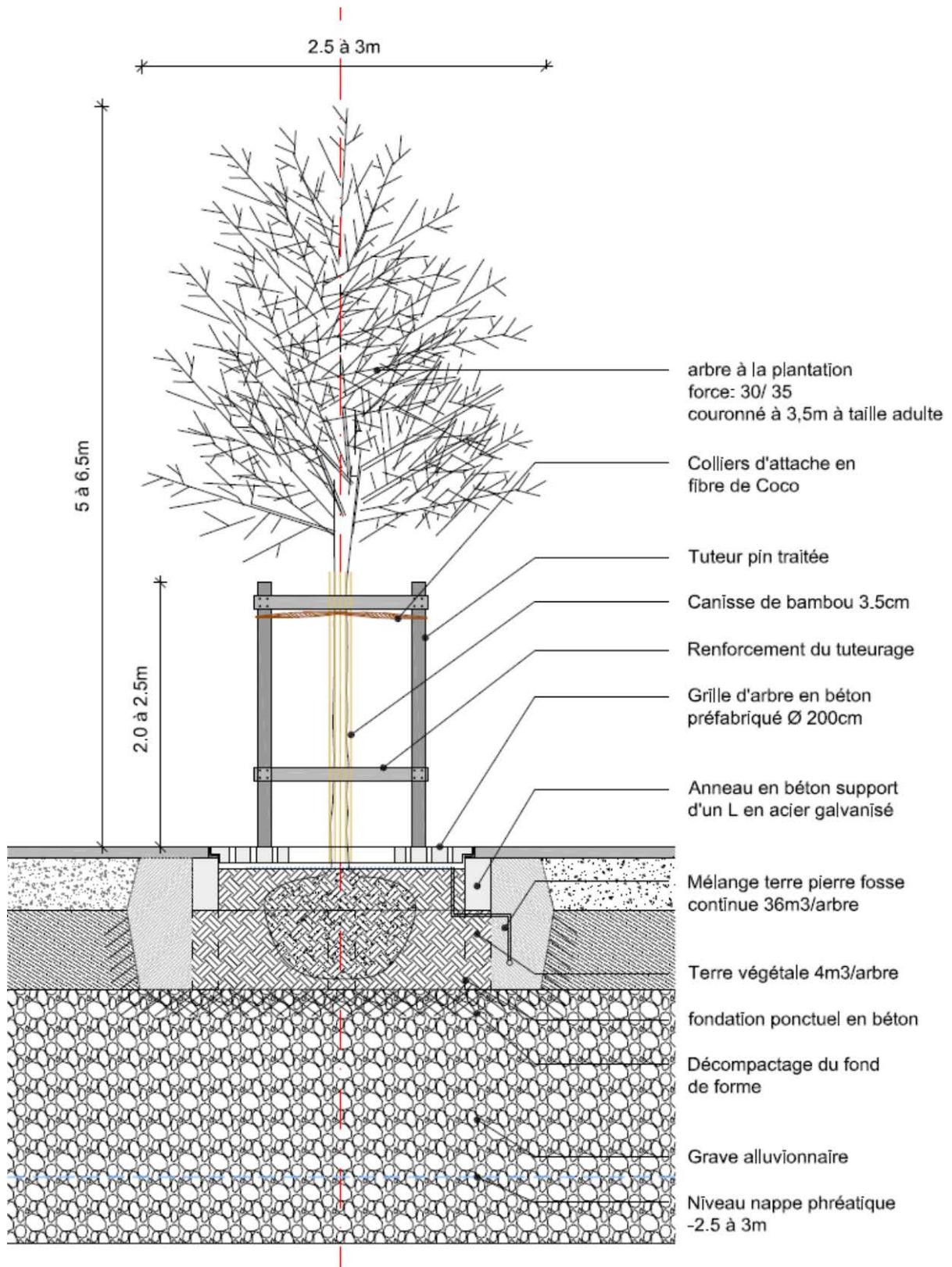


Figure 3. Plan des fosses de plantations de la plaine de Plainpalais.

Grossissement des troncs

Le grossissement des troncs permet de vérifier le bon établissement des arbres (Gillig et al. 2008). Les quatre arbres sélectionnés ont fait l'objet d'un suivi annuel depuis leur plantation (Tableau 2). L'année 2013 étant la première année sans système d'arrosage, ces résultats pourront nous montrer l'influence du stress hydrique sur le taux de croissance des arbres.

Tableau 2. Grossissement annuel de la circonférence du tronc de chacun des quatre arbres (en fonction de leur numéro de plantation) à 1m de hauteur (CBH : Circonférence at Brest Height) depuis la plantation.

CBH [cm]	Mars 2010 ^a	Nov. 2010 ^a	Oct. 2011 ^a	Nov. 2012 ^a	Nov. 2013 ^b
<i>Tilia cordata</i> (9)	44	45	48	50	52.5
<i>Ulmus carpiniifolia</i> (14)	50	51	56	64	68
<i>Celtis australis</i> (10)	51	51.5	52	56	58.5
<i>Prunus avium</i> (15)	42	44.5	51	57.5	61.5

a: les arbres sont régulièrement arrosés. b: les arbres n'ont bénéficié d'aucun arrosage.

En 2013, le grossissement varie entre 2.5 et 4 cm. Ces valeurs de grossissement sont inférieures à celles mesurées en 2012 (exception faite du *Tilia cordata*) mais restent en accord avec la moyenne calculée sur les années précédentes (qui varie entre 2 et 5 cm) et peuvent montrer l'effet du stress hydrique sur la croissance des arbres.

A noter dès à présent, que ces résultats montrent que l'étude menée en 2013 ne semble pas avoir eu d'influence sur la croissance des arbres. La comparaison avec les résultats de la croissance circonférentielle de 2014 permettra de vérifier cette hypothèse.

2.2 Etude de la transpiration

La transpiration sera déterminée selon deux approches :

- une mesure directe du flux de sève selon la méthode Granier (1985)
- une estimation à partir de l'équation de Penman-Monteith selon la Food and Agricultural Organisation (FAO) modifiée par Pereira et al. (2006).

2.2.1 Mesure de flux de sève

La mesure du flux de sève a été faite selon la méthode de Granier (1985) qui utilise la dissipation de chaleur comme traceur du flux.

Système de mesure

Deux sondes sont insérées radialement dans le bois d'aubier (Figure 4). La sonde supérieure est chauffée à température constante. La sonde inférieure sert de température de référence. A flux nul, la différence de température entre les deux sondes est à son maximum (environ 10°C). A 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.

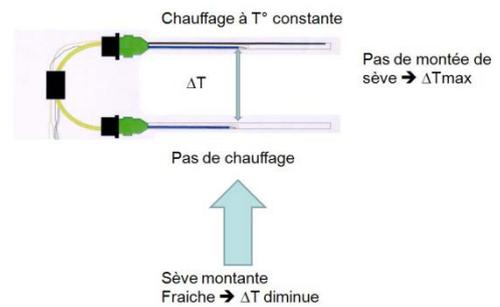


Figure 4. Méthode de Granier : Principe de mesure

L'estimation de la densité du flux de sève (transpiration) est indirecte et se fait en deux étapes à partir de la différence de température entre les deux sondes.

Une première relation empirique permet de déterminer la vitesse du flux de sève (Eq.1 et 2)

$$SF = \alpha * K^\beta \quad \text{Equation 1}$$

Avec, SF : vitesse du flux de sève [$l \text{ dm}^{-2} \text{ h}^{-1}$], α : 4.2841, β : 1.231 et K : indice du flux sans unité, déterminé suivant la relation ci-dessous :

$$K = (\Delta T_{max} - \Delta T) / \Delta T \quad \text{Equation 2}$$

Avec, ΔT_{max} : différence de température maximale enregistrée entre les deux sondes (théoriquement à flux nul) et ΔT : différence de température mesurée entre les sondes.

Ensuite, la transpiration totale (E) est estimée selon l'équation suivante :

$$E = SF * As \quad \text{Equation 3}$$

Avec As : la section conductrice de l'arbre.

Chaque arbre a été équipé de quatre sondes, positionnées aux quatre points cardinaux. Des sondes de 30mm (TDP30) et 50mm (TDP50) de long ont été utilisées pour une meilleure estimation des variations radiales des flux de sève.

Les sondes ont été placées de la manière suivante :

- Nord : TDP50
- Ouest : TDP30
- Est : TDP50
- Sud : TDP30

C. australis a quant à lui été équipé de quatre sondes de 10mm (TDP10). Une étude préalable sur *C. australis* (Ruepp, 2010) a montré qu'il n'y a pas de différence entre l'utilisation de sondes TDP10, 30 et 50.

2.2.2 Détermination de la zone conductrice par impédance électrique

La détermination de la zone conductrice (A_s) est indispensable pour passer de la vitesse du flux (Eq. 1) à l'estimation de la transpiration totale (Eq. 3).

La détermination de A_s a été faite par impédancemétrie (EIT, Electrical Impedance Tomography). Cette méthode permet une approche dite *non-destructive* (ou quasi *non-destructive*) (Brazee et al. 2010) pour estimer la surface du bois conducteur. L'impédance électrique détermine la conductivité électrique des tissus ligneux. Une forte concentration en eau dans le tronc (impliquant une forte concentration en ions) induit une plus forte conductivité électrique et donc une plus faible résistance. A l'inverse, une zone de plus faible concentration en eau induit une plus grande résistance.

Dans un tronc sain, on observera en général une structure centrale avec une résistivité maximale constituant le bois de cœur (Figure 5). Cette résistivité électrique tend à diminuer vers l'extérieur.

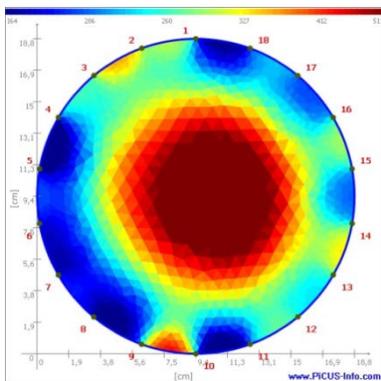
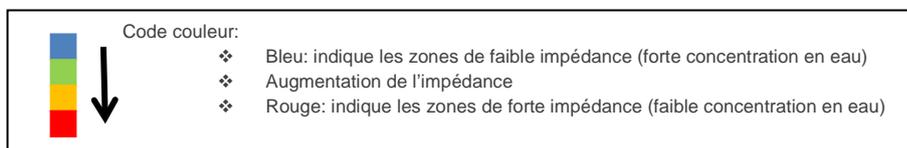


Figure 5. Tomographie par impédance électrique sur *Prunus avium*



2.2.3 Penman-Monteith

L'équation de Penman-Monteith permet d'estimer l'évapotranspiration d'un couvert végétal à partir de données météorologiques. Reprise par la FAO, cette équation (FAO-PM) permet de calculer une évapotranspiration de référence correspondant à celle d'un couvert végétal d'herbeux (généralement du gazon) remplissant des conditions spécifiques (hauteur de 0.12 m, une surface de résistance de 70 s m^{-1} et un albedo de 0.23 (Allen et al. 1998)).

$$E_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34 \cdot u_2)} \quad \text{Equation 4}$$

Avec : E_0 : l'évapotranspiration de référence [mm jour^{-1}], Δ : pente de la courbe de pression de vapeur saturante [$\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$], R_n : le rayonnement net à la surface du couvert végétal [W m^{-2}], γ : constante psychrométrique [$\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$], T : la moyenne journalière de température à 2 m de hauteur [$^\circ\text{C}$], u_2 : la vitesse du vent à 2 m de hauteur [m s^{-1}], $(e_s - e_a)$: le déficit de pression de vapeur [kPa] et G : la densité du flux de chaleur au sol.

La transpiration des arbres, selon Pereira et al. (2006) (mFAO-PM) peut être estimée à partir de cette équation (Eq.4) et est présentée comme suit:

$$E'_0 = \frac{E_0 * A_L}{2.88} \quad \text{Equation 5}$$

Avec : E'_0 : la transpiration de l'arbre [$\text{l plante}^{-1} \text{ jour}^{-1}$], A_L : la surface foliaire [m^2 de feuilles plante^{-1}], E_0 : Evapotranspiration de référence [mm jour^{-1}] et 2.88 : la surface foliaire de référence du couvert végétal.

Détermination de la surface foliaire

La détermination de la surface foliaire (A_L) est indispensable pour le calcul de la transpiration de l'arbre (E'_0 , Eq.5). Dans cette étude, l'indice foliaire des quatre arbres étudiés a été déterminé par régression (durant les périodes d'eau disponible uniquement) en utilisant l'équation 5 :

$$A_L = \frac{E * 2.88}{E_0} \quad \text{Equation 6}$$

L'usage de cette équation pour la détermination du A_L nécessite qu'en période d'eau disponible, E et E'_0 soient corrélés.

2.3 Suivi de l'état hydrique du sol

Suivi par water sensor

Le suivi de l'état hydrique du sol a été réalisé avec des sondes *Watermark* (Irrometer®Company Inc., Riverside, USA) (Figure 6). Ces dernières permettent une mesure indirecte du potentiel matriciel. Cinq sondes ont été placées dans chacune des quatre fosses de plantations de la manière suivante :

- ✓ Une sonde à 30cm de profondeur
- ✓ Une sonde à 50cm de profondeur
- ✓ Trois sondes à 80cm de profondeur

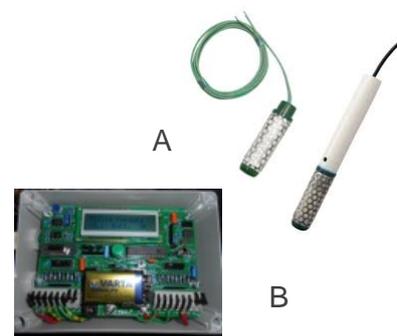


Figure 6. Sonde *Watermark* (A) et boîtier de mesure (B).

Le positionnement des sondes permettait d'une part de voir le dessèchement du sol de la surface vers la

profondeur et les 3 sondes à 80 cm ont permis de calculer une moyenne de l'évolution du potentiel matriciel au plus près des racines des arbres.

2.4 Etude des facteurs environnementaux

Une station météorologique (Campbell Scientific), équipée de capteurs de température (T), d'humidité relative (Hr), de rayonnements solaires (Rs), de vitesse du vent (Ws) et de précipitations, a été placée sur le site d'étude. Les instruments utilisés sont décrits dans le Tableau 3. Ils ont été placés sur un trépied de 4 m de hauteur et de manière à ce qu'aucun n'instrument ne fasse obstruction aux autres (Figure 7). Les données ont été récoltées toutes les 5 minutes par un Data logger CR1000 (Campbell Scientific, Inc., Logan, UT, USA).

Tableau 3. Description du matériel utilisé pour la prise de données climatologiques

Mesures	Dispositifs	Gamme de mesures	Précision
Température	CS215	-40°C; +70°C	±0.5 °C (over +5°C to +40°C)
Humidité relative	CS215	0-100%	± 4 %
Vitesse du vent	03002-5 R.M Young Wind sentry	0-50 [m/s]	0.5 [m/s]
Radiations solaires	SP-110	0-1100 [Wm ⁻²]	±5 %
Pluviomètre	52202 R.M Young	25mm/hr	0.1 [mm]



Figure 7. Station météorologique sur le site d'étude

3. Résultats et Discussion

3.1 Transpiration selon la mesure du flux de sève

3.1.1 Cycle journalier de la vitesse de flux

Les résultats présentés ci-dessous comprennent les mesures enregistrées de juin à octobre 2013 (période de transpiration optimale).

La Figure 8 présente la vitesse de flux estimée selon la méthode de Granier (Eq. 1) sur une période de 14 jours durant laquelle l'eau est trouvée en suffisance dans le sol (< 100 Cbars). La vitesse de flux a été estimée à partir de la moyenne des 4 sondes TDP et d'un ΔT_{max} quotidien. Les valeurs de vitesse de flux sont données avec une marge d'erreur de $\pm 0.02 \text{ l dm}^{-2} \text{ h}^{-1}$.

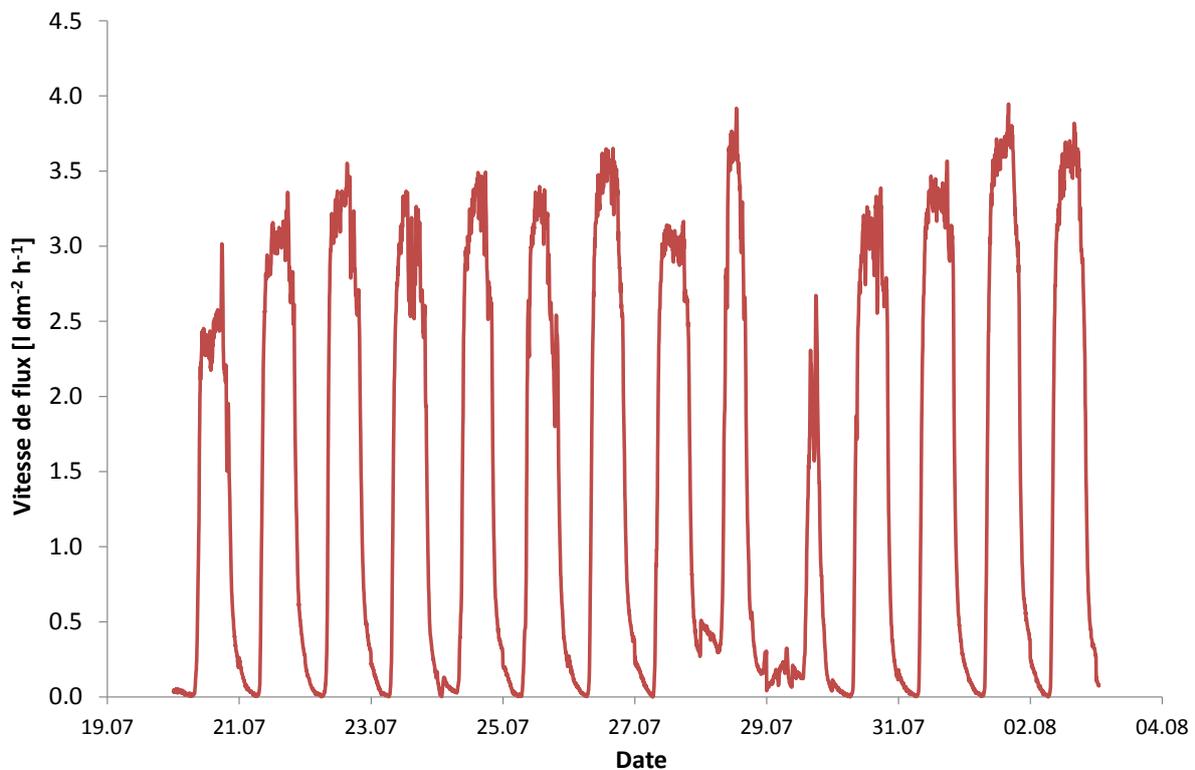


Figure 8. Estimation de la vitesse du flux de sève [$\text{l dm}^{-2} \text{ h}^{-1}$] de *Prunus avium* 'plena' sur une période de 14 jours durant laquelle l'eau est trouvée en suffisance dans le sol (potentiel matriciel en dessous de 100 Cbars).

Tous les arbres présentent une cinétique horaire de vitesse du flux de sève comparable à celle présentée ci-dessus (Figure 8). Les cycles nocturnes et diurnes sont aisément observables : le flux augmente peu après le lever du soleil, atteint un plateau en milieu de journée et redescend en fin de journée. La durée de chaque cycle dépend principalement de la saison (durée d'ensoleillement) et du climat. Les données de chaque arbre divergent essentiellement dans les maxima et la moyenne journalière atteinte (Tableau 4).

La Figure 8 présente le 29 juillet une vitesse de flux plus faible : cette journée a été marquée par (i) un faible ensoleillement avec une moyenne de radiations solaires de 75 W m^{-2} (contre 228 W m^{-2} en moyenne sur la saison) et (ii) de fortes précipitations avec un total journalier atteignant les 83 mm (mesure sur la plaine de Plainpalais, confirmée par les stations météo du réseau Agrométéo). Cet exemple montre l'effet du climat (ensoleillement et précipitations en particulier) sur le flux, faisant chuter la moyenne journalière de 1.2 à $0.5 \text{ l dm}^{-2} \text{ h}^{-1}$ dans le cas de *Prunus avium*.

Le Tableau 4 synthétise les données de flux de sève obtenues de juin 2013 à octobre 2013.

Tableau 4. Vitesse de flux mesurée sur les quatre arbres. Les résultats présentés proviennent de la moyenne des 4 sondes de chacun des arbres calculée sur la période d'étude : juin à octobre 2013, en considérant aussi bien les périodes d'eau disponible que les périodes de sécheresse.

	Vitesse de flux ($\text{L dm}^{-2} \text{ h}^{-1}$)			
	journalière			horaire
	Moyenne	Maximum	Minimum	Maximum
<i>T. Cordata</i>	0.98	1.72	0.16	5.47
<i>U. Carpinifolia</i>	1.06	1.5	0.24	3.90
<i>C. australis</i>	0.69	1.03	0.2	4.49
<i>P. avium</i>	1.11	1.83	0.27	5.21

Ces résultats mettent en évidence une variabilité entre les arbres : la vitesse de flux mesurée donne dans l'ordre (décroissant) : *P. avium* \geq *U. carpinifolia* \geq *T. cordata* \geq *C. australis*. Les trois premiers présentent peu de différence entre eux comparé à *C. australis*. Ces différences peuvent s'expliquer par une physiologie et/ou une surface foliaire différente et seront traitées plus bas (Cf. chapitre. 3.3)

Les résultats de octobre 2013 à mai 2014 sont détaillés dans les chapitres 3.6 et 3.7.

3.1.2 Détermination de la zone conductrice

La tomographie par impédance électrique (EIT) a été utilisée pour déterminer la surface du bois d'aubier. Deux mesures ont été réalisées par arbre. La première (Figure 9A et Figure 10A) a été réalisée le matin du 25 octobre 2013 (hormis pour *C.australis* qui date du 3 septembre). La seconde (Figure 9B et Figure 10B) a été réalisée le 6 novembre en milieu de journée. L'utilisation de l'EIT pour la détermination de la surface conductrice d'aubier est encore peu développée et plusieurs tests préalables ont été nécessaires à son utilisation. Ces mesures d'impédance ont donc été faites tardivement dans la saison et correspondent à

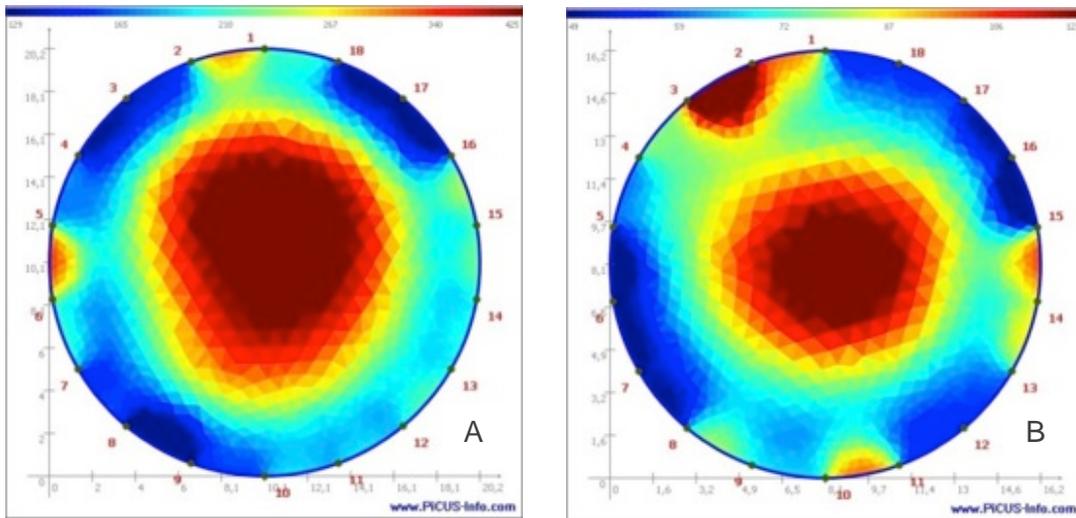
la baisse de flux en fin de saison sur les quatre arbres (Cf. chapitre 3.7). De ce fait, il est possible que la surface conductrice mesurée ici soit en réalité moins importante que celle des mois d'été. Les résultats de transpiration peuvent donc se trouver sous-estimés.

La couleur bleue des figures 9 et 10 indique les zones de faible résistance électrique révélant une zone de forte concentration en eau tandis que le rouge signale une zone de forte résistivité électrique impliquant une faible concentration en eau. Ces informations permettent de délimiter la surface du bois d'aubier, bois conducteur avec une forte teneur en eau. Il est important de noter que ces deux couleurs n'indiquent qu'une augmentation ou une diminution de la contenance en eau du tronc mais que les échelles sont différentes pour chaque tomographie.

Les nombres (de 1 à 18) représentent le nombre d'électrodes utilisées pour la mesure et leur emplacement autour de l'arbre : n°1 au Nord, n^{os}5/6 à l'Ouest, n°10 au Sud et n^{os}14/15 à l'Est.



Celtis australis



Ulmus carpinifolia

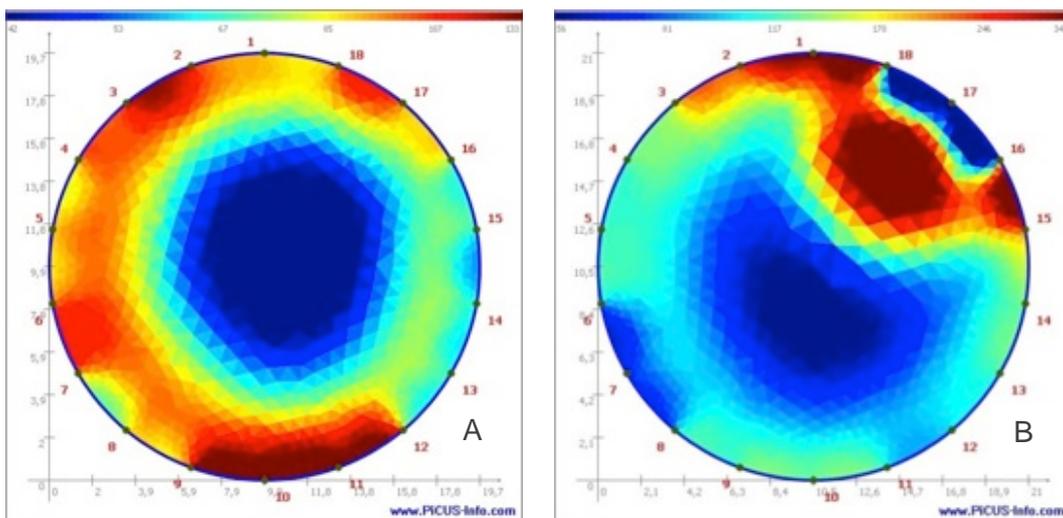
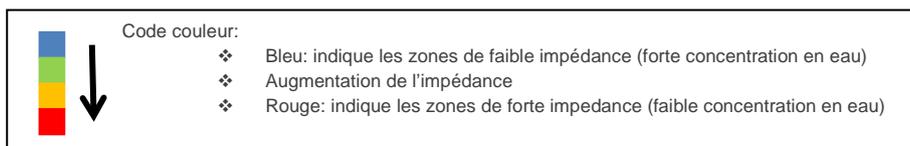
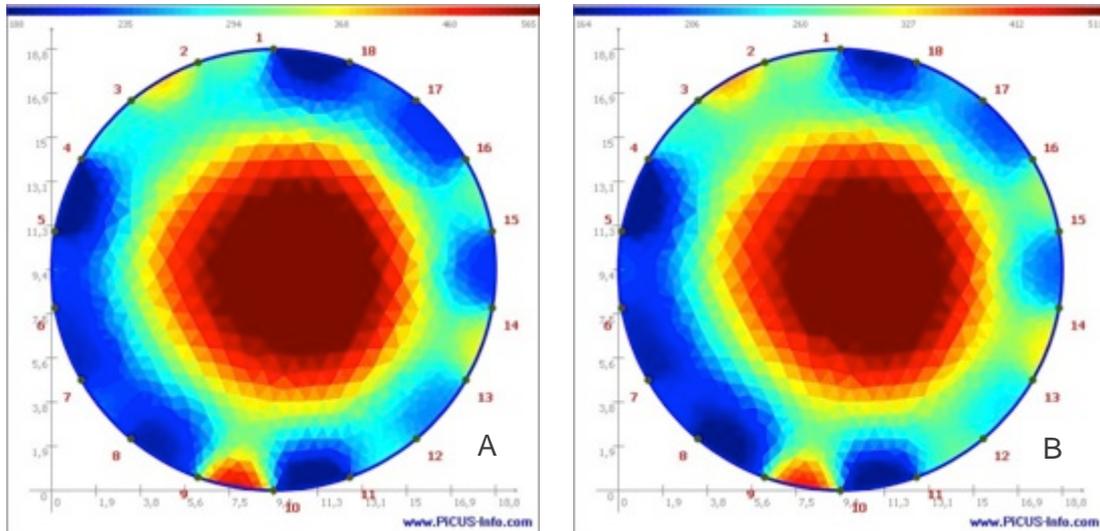


Figure 9. Tomographie par Impédance Electrique (EIT) de *Celtis australis* et *Ulmus carpinifolia* indiquant la distribution de l'eau dans le tronc. A : relevé le 25 octobre (hormis pour *C.austalis* 3 septembre) et B : le 6 novembre 2013.





Prunus avium 'plena'



Tilia cordata

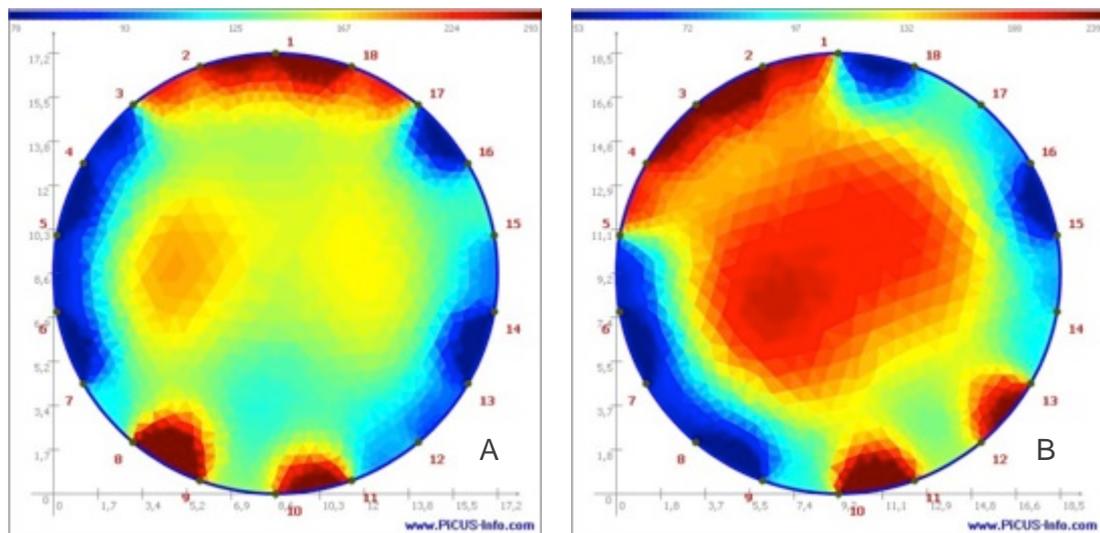
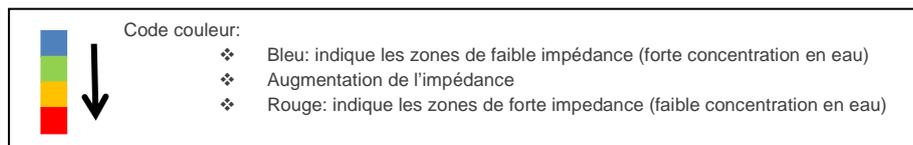


Figure 10. Tomographie par Impédance Electrique (EIT) de *Prunus avium* et *Tilia cordata* montrant la distribution de l'eau dans le tronc. A : relevé le 25 octobre et B : le 6 novembre 2013.



Les images de tomographie mettent en évidence une nouvelle fois, une variabilité entre les arbres. L'estimation de la surface du bois conducteur n'est pas la même d'un arbre à l'autre : chez *U. carpinifolia*, la quasi-totalité du bois semble conductrice alors que pour les autres essences (*P. avium*, *T. cordata* et *C. australis*) seule la périphérie du tronc est conductrice.

Tableau 5. Zone conductrice estimée par EIT pour chacun des quatre arbres étudiés

Zone conductrice:	En mm sous le cambium	En dm ²
<i>Tilia cordata</i>	30	1.38
<i>Ulmus carpinifolia</i>	100	3.14
<i>Celtis australis</i>	50	2.04
<i>Prunus avium</i>	50	2.36

3.1.3 Transpiration des arbres

L'estimation de la surface du bois d'aubier conducteur (Tableau 5) a permis à partir des données de flux de sève (Figure 8) d'estimer le volume transpiré pour chaque arbre (Tableau 6).

Tableau 6. Valeurs de transpiration journalière (l jour⁻¹) de chacun des arbres étudié sur toute la période d'étude (13 Juin au 1^{er} Octobre 2013).

	Transpiration (E) (l jour ⁻¹)			
	<i>Tilia cordata</i>	<i>Ulmus carpinifolia</i>	<i>Celtis australis</i>	<i>Prunus avium</i>
Moyenne	31.77	80.49	34.09	62.9
Maximum	57.06	113.29	50.89	103.9
Minimum	5.46	18.64	9.96	15.35

La moyenne de la transpiration journalière varie entre 30 et 80 l jour⁻¹. Deux arbres transpirent peu : *T. cordata* et *C. australis* tandis que les deux autres transpirent deux fois plus : *U. carpinifolia* et *P. avium*.

En périodes d'eau disponible, la moyenne de transpiration journalière augmente d'environ 5% (hormis *T. cordata* + 30%) menant à des moyennes journalières de 41.6, 83.4, 35.4 et 68.2 l jour⁻¹ respectivement pour *T.cordata*, *U.carpinifolia*, *C. australis* et *P.avium*.

Les valeurs de transpiration sont dépendantes de la taille de la surface de l'aubier : *U. carpinifolia* présente la plus grande surface de bois conducteur et transpire davantage que les autres arbres ; il est suivi par *P. avium*, *C. australis* et *T. cordata*.

La transpiration de *C. australis* paraît néanmoins faible. Les résultats attendus étaient plus proches de ceux de *P. avium* du fait de sa morphologie.

Selon leur taux de transpiration journalière (Figure 11), les arbres peuvent être classés dans l'ordre décroissant suivant : *U. carpinifolia* > *P. avium* > *C. australis* > *T. cordata*.

Ces résultats confrontés à la première classification (Cf Chapitre 3.1.1 et Tableau 4) montrent une nouvelle tendance, et en particulier l'importance de la surface du bois d'aubier dans la détermination de la transpiration des arbres.

Pour confirmer ces résultats, ceux-ci ont été comparés aux estimations obtenues à partir de l'équation mFAO-PM (Equation 5).

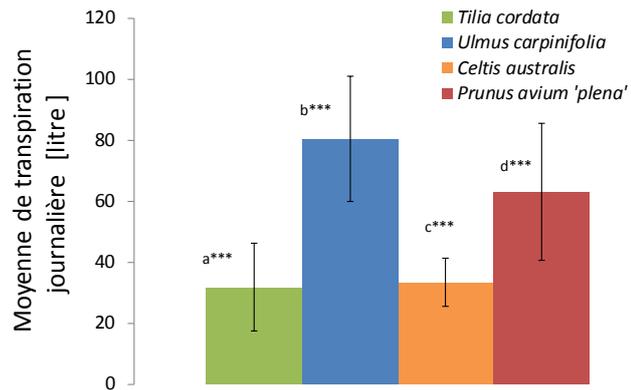


Figure 11 Comparaison des moyennes de transpiration journalière des quatre arbres étudiés, montrant une différence significative (***) de transpiration (Statistiques réalisées par un T Test pour données appariées (comparaison journalière des variations de transpiration) avec un intervalle de confiance de 99.9%).

3.2 Transpiration selon l'équation de FAO Penman-Monteith

Pereira et al. (2006) proposent d'utiliser l'équation de Penman-Monteith modifiée (mFAO-PM, Eq. 5) et adaptée à l'estimation de la transpiration d'arbres en milieu urbain. Pour cela il est indispensable d'estimer : (i) la disponibilité en eau des arbres (en effet FAO-PM a été établie pour des surfaces végétalisées et irriguées) ; (ii) la surface foliaire des arbres (A_L , m^2) et (iii) les différents paramètres climatiques à entrer dans l'équation à savoir : la température (T), le rayonnement solaire (S_r), le déficit de pression de vapeur (VDP) et la vitesse du vent (W_s).

Dans un premier temps nous allons estimer les périodes de disponibilité en eau des arbres au moyen de sondes Watermark, puis nous étudierons la surface foliaire avant de déterminer à l'aide des paramètres climatiques importants la transpiration selon l'équation mFAO-PM.

3.2.1 Mesure du potentiel matriciel dans les fosses de plantation

Le potentiel matriciel a été suivi durant toute l'étude et a permis d'identifier des périodes de stress hydrique potentiel pour les arbres. Le seuil de stress hydrique est pris à 100 Cbars pour les sondes placées à 80 cm de profondeur (les racines étant théoriquement plus profondes). En l'absence de précipitations, le potentiel matriciel augmente d'environ 10 Cbars par jour, allant certains jours de forte demande climatique (évapotranspiration) jusqu'à 20 Cbars.

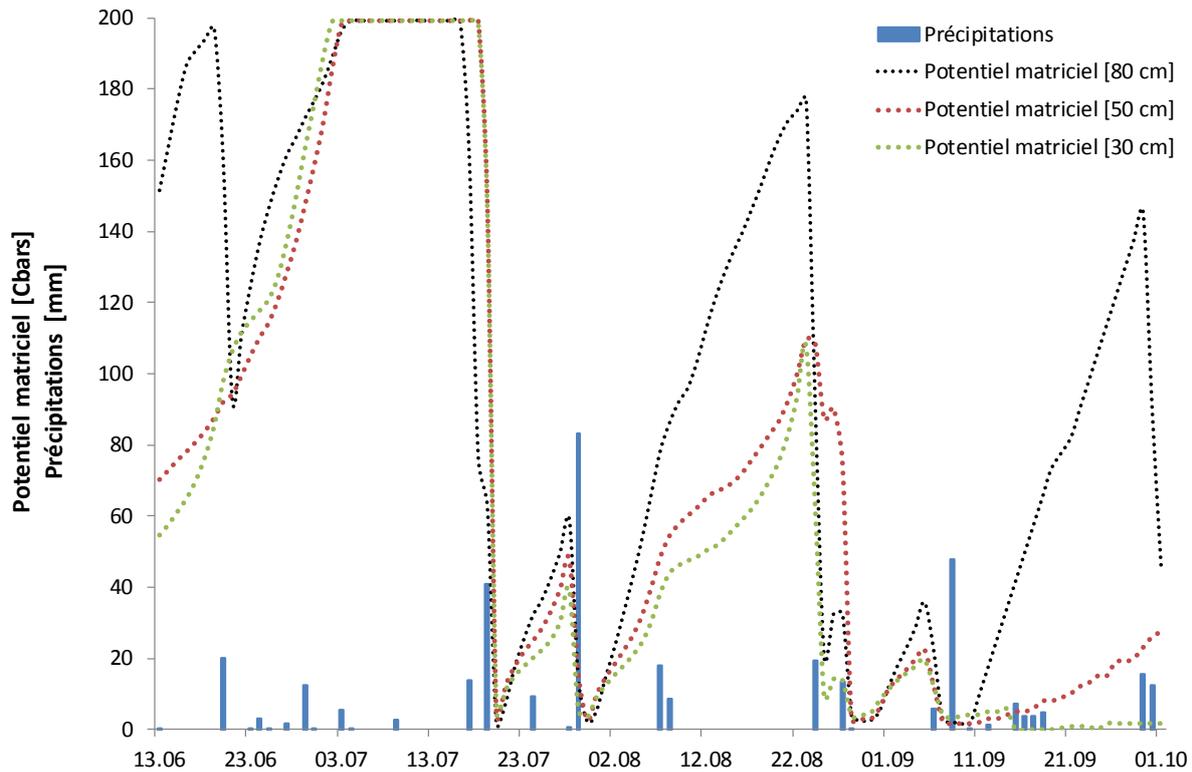


Figure 12. Potentiel matriciel de la fosse de plantation de *T.cordata*. En bleu : les précipitations, en noir : la moyenne des 3 sondes placées à 80 cm de profondeur, en rouge : sonde à 50 cm et en vert : sonde à 30 cm de profondeur. Toutes les sondes sont placées à 1 m du tronc.

La Figure 12 décrit les variations de teneur en eau du sol dans la fosse de plantation de *T.cordata*. Cette dernière est néanmoins représentative du suivi hydrique des quatre arbres étudiés. Le suivi du potentiel matriciel nous permet de constater que les pluies de moins de 40 mm ne suffisent généralement pas à ré-humidifier le sol en profondeur. Il apparaît de plus, que les racines puisent préférentiellement l'eau en profondeur (le potentiel matriciel à 80 cm augmente plus rapidement qu'à 50 ou 30 cm). La chute de la moyenne des 3 sondes à 80 cm de profondeur le 21 juin 2013 est inattendue et est observée dans chacune des quatre fosses. Cette baisse de potentiel est difficilement attribuable à la pluie du 20 juin étant donné que seules les sondes à 80 cm sont concernées. Il est cependant possible qu'une augmentation du niveau de la nappe ou qu'un débordement des conduites et canalisations souterraines aient abaissé le potentiel matriciel du sol à cette profondeur. C'est le seul épisode de ce genre enregistré durant l'étude. Par ailleurs, entre le 13 juin et le 1^{er} octobre 2013, trois périodes de stress hydrique ont été identifiées (du 5 au 16 juillet 2013 ; du 11 au

23 août 2013 et du 23 au 30 septembre 2013). Ces dernières seront écartées, dans un premier temps, pour l'estimation du volume de transpiration selon l'équation de Penman-Monteith.

3.2.2 Détermination de l'indice foliaire

Equation de FAO - Penman-Monteith modifiée (Pereira et al. 2006)

L'indice foliaire a été déterminé par régression sur l'équation de mFAO-PM (Eq. 6).

L'équation FAO-PM (Eq. 4) ne prend pas en considération les périodes de stress hydriques. Le facteur de correction (A_L) a donc, en premier lieu, été appliqué durant les deux périodes d'eau disponible enregistrées au cours de l'étude : la première (I) débute le 18.07.13 et se termine le 11.08.13 ; la seconde (II) se déroule du 28.08.13 au 25.09.13.

En période d'eau disponible, une bonne corrélation est observée entre E (Eq. 3) et E'_o (Eq. 5) (Figure 14). Les deux méthodes divergent de moins de 5% et le facteur de corrélation est en moyenne de 0.8. Tous les arbres montrent des résultats similaires (hormis *Celtis australis* - r^2 : 0.25- dont le cas est discuté plus bas. Ch.3.4).

De par la bonne corrélation, en période d'eau disponible, entre E et E'_o , le A_L a été ajusté par régression de telle sorte que E'_o soit égale à E (Tableau 7).

Tableau 7. Indice foliaire [m^2] de *T.cordata*, *U.carpinifolia*, *C.australis* et *P.avium* par régression sur l'équation mFAO-PM en période I (18.07.13 au 11.08.13) et période II (du 28.08.13 au 25.09.13) montrant l'évolution de la couronne foliaire au cours du temps.

	<i>Tilia cordata</i>	<i>Ulmus carpinifolia</i>	<i>Celtis australis</i>	<i>Prunus avium</i>
A_L [m^2]				
Période I	16.61	36.04	14.70	31.07
Période II	23.79	45.79	20.54	38.29

Pour une meilleure régression entre E'_o et E , une augmentation de A_L s'avère nécessaire en période II. En conservant la même surface foliaire pour les périodes I et II, un décalage est observé entre E et E'_o en période II (E'_o sous-estimé par rapport à E). Ce changement de A_L peut s'expliquer par une augmentation de la surface foliaire. Effectivement, cette dernière selon Breda (1999) atteint sa pleine expansion mi-août. La Figure 13 confirme l'augmentation de A_L de Juin à Septembre chez *T.cordata* (+ 30%

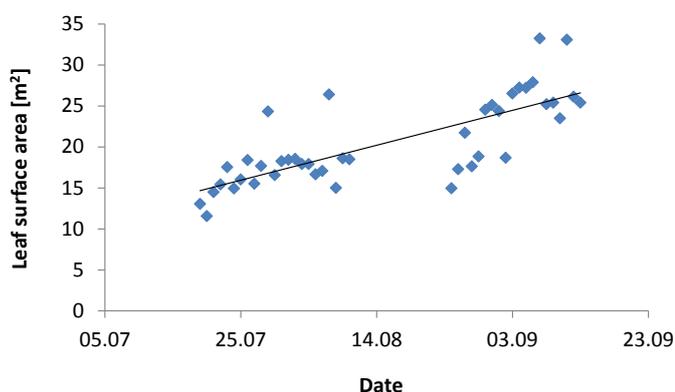


Figure 13. Evolution de la surface foliaire [m^2] au cours du temps de *T.cordata* Les deux groupes constituent les deux périodes d'eau disponible (Juillet/ Août).

sur la différence de moyenne entre juillet et août). Cette augmentation de surface foliaire est vérifiée pour les quatre essences.

Pour chaque période (I et II) et chaque arbre, un A_L différent a été déterminé (Tableau 7). Le changement s'opère le 24 Août (début de la période II) pour tous les arbres.

Par conséquent, pour prendre en considération l'évolution temporelle de la surface foliaire, le facteur de correction appliqué pour l'estimation de la transpiration des arbres (E'_0), est celui fourni par l'équation de régression.

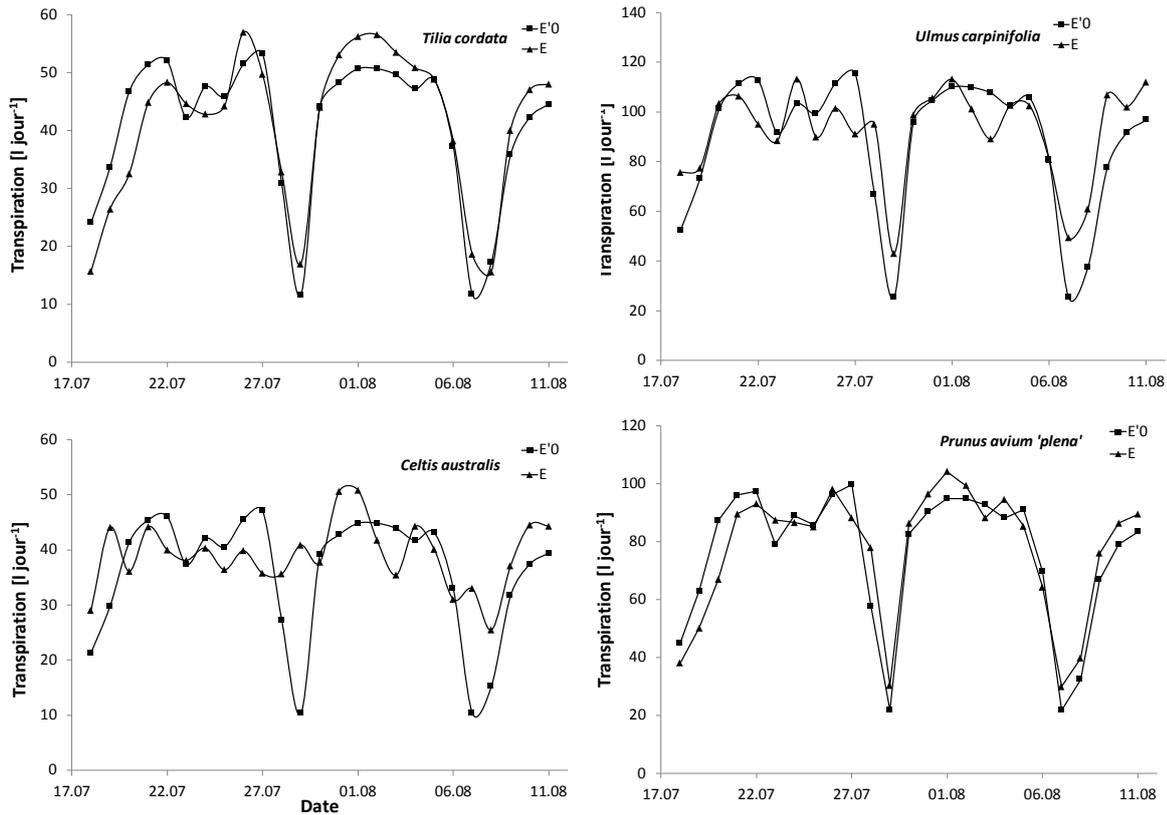


Figure 14. Comparaison, durant la première période d'eau disponible (18.07 au 11.08 2014), de l'estimation de la transpiration selon la méthode du flux de sève et l'équation de FAO-Penman-Monteith modifiée par Pereira et al. (2006) avec A_L déterminé par régression.

Sachant qu'en période d'eau disponible, les deux méthodes d'estimation de la transpiration (mesure flux de sève et estimation selon Penman-Monteith) sont semblables, il est intéressant de les comparer sur toute la période d'étude en considérant les périodes de stress hydrique autant que les périodes d'eau disponible.

3.3 Variation du flux de sève en période de stress hydrique

La comparaison de l'estimation de la transpiration par l'équation mFAO-PM (E'_0) à celle mesurée par les sondes Granier (E) met en évidence deux comportements différents :

- en période d'eau disponible les deux approches offrent une estimation tout à fait comparable (Figure 14)
- tandis qu'en période de stress hydrique (potentiel matriciel > 100 Cbars), les différences sont plus importantes.

Chaque arbre ne réagit cependant pas de la même façon face au stress hydrique. Les résultats (Figure 15 à Figure 18) présentés ci-dessous montrent la comparaison entre E et E'_0 mis en lien avec le potentiel matriciel, du 4 Juillet au 1^{er} Octobre 2013. Le relevé de la vitesse de vent ne fonctionnant pas avant cette date, l'estimation de E'_0 était impossible.

Tilia cordata

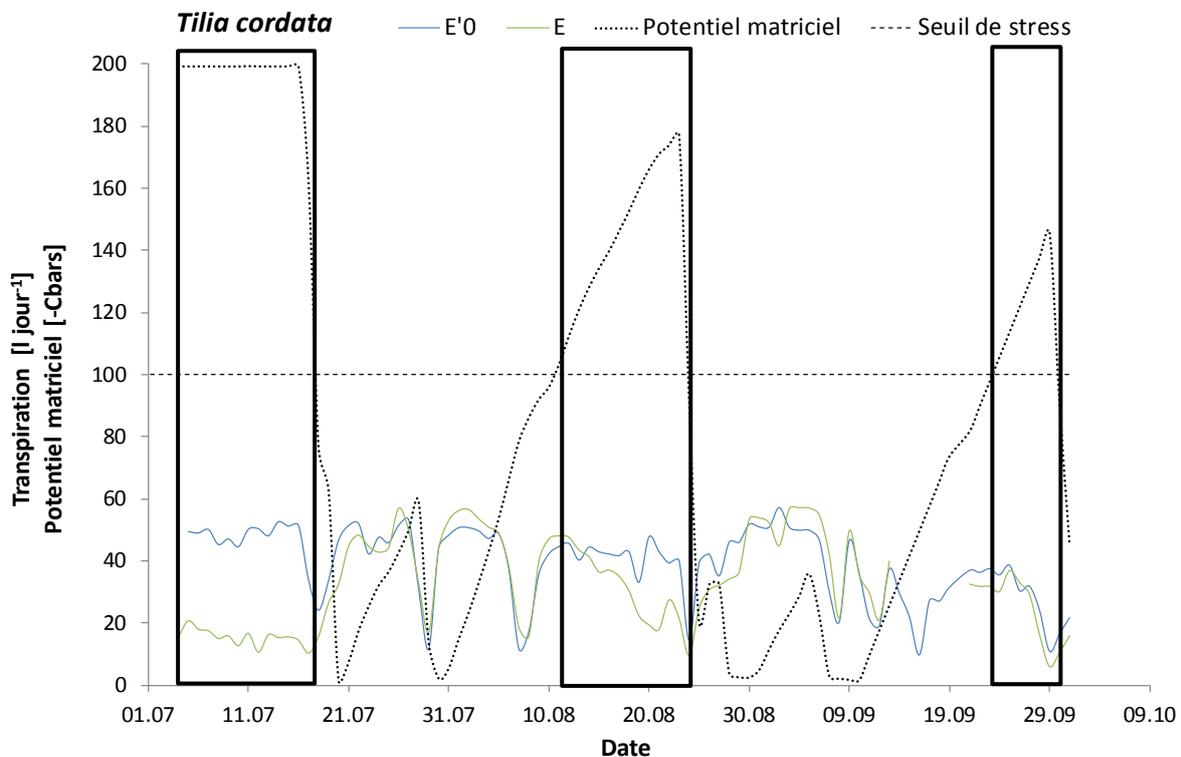


Figure 15. Transpiration journalière mesurée et potentielle de *Tilia cordata* mis en lien avec le potentiel matriciel. En vert : la transpiration mesurée (E), en bleu : la transpiration selon Pereira et al. (2006) (E'_0), en pointillé le potentiel matriciel. En encadré, les périodes de stress.

Dû à des dommages occasionnés sur les sondes, les résultats de *T.cordata* sont inexploitable du 14 au 19 Septembre.

Tilia cordata a traversé trois périodes de sécheresses (Figure 15). La première (du 3 au 16 Juillet 2013) montre que la transpiration mesurée (moyenne de 15.33 l jour⁻¹) se trouve bien

en dessous de celle estimée (E'_o en moyenne de $45.83 \text{ l jour}^{-1}$) dénotant une différence de 70% entre les deux courbes.

Une deuxième discontinuité entre les deux approches est observée durant la seconde période de sécheresse (du 11 au 23 août 2013). Durant cette période la transpiration de *T.cordata* chute de 48.02 à $21.49 \text{ l jour}^{-1}$ menant à une diminution de l'ordre de 60% de la transpiration (E). Cette baisse de flux se produit à partir du moment où le potentiel matriciel atteint les 100 Cbars montrant l'influence du déficit d'eau dans les sols sur la transpiration de l'arbre. Le Tilleul, de part ce comportement, est considéré comme une essence partiellement résistante à la sécheresse (Krööt et al. 2004, Köcher et al. 2009).

La troisième période de sécheresse (du 24 au 29 Septembre 2013) ne semble pas avoir eu d'incidence sur la de transpiration de l'arbre. Aucune réduction de E n'est observée et la bonne corrélation entre E et E'_o est maintenue ($r^2 : 0.94$)

Prunus avium 'plena'

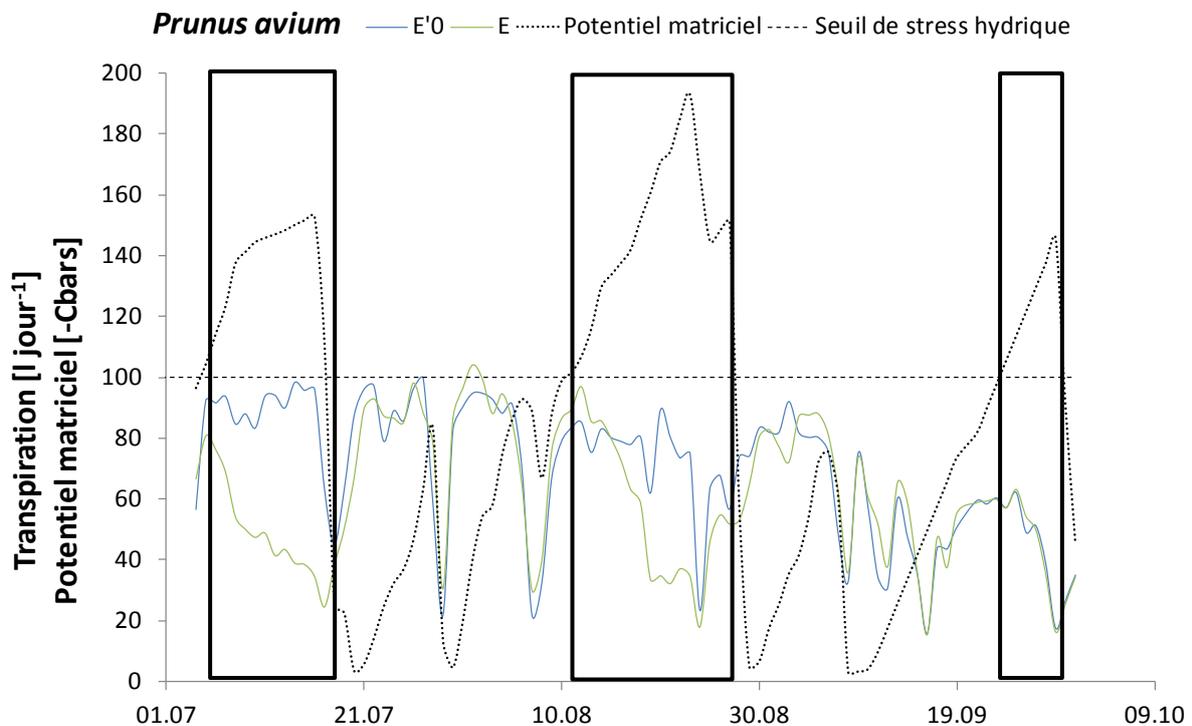


Figure 16. Transpiration journalière mesurée et potentielle de *Prunus avium* 'plena' mis en lien avec le potentiel matriciel. En vert : la transpiration mesurée (E), en bleu : la transpiration selon Pereira et al. (2006) (E'_o), en pointillé le potentiel matriciel. En encadrés, les périodes de stress.

Prunus avium a traversé trois périodes de stress hydrique (Figure 16). La première, du 5 au 16 Juillet, montre une baisse graduelle de la transpiration passant d'une moyenne journalière d'environ 80 à 38 l jour^{-1} . Cette baisse représente une diminution de la transpiration d'environ

60% expliqué par un manque d'eau dans le sol (confirmé par les données du potentiel matriciel). La même observation est faite pour la deuxième période de sécheresse (du 11 au 23 août 2013) où la transpiration est trouvée diminuée de 60% et également liée à un haut potentiel matriciel.

La troisième période de sécheresse (du 23 au 30 Septembre 2013) au même titre que *T.cordata*, ne semble pas avoir eu de conséquences sur la transpiration de l'arbre. Ici aussi, aucune réduction de E n'est observée et la bonne corrélation entre E et E'_0 est conservée ($r^2 : 0.98$).

La réponse de *P.avium* face au stress hydrique semble très similaire à celle observée sur *T.cordata*. Les deux essences montrent une baisse de transpiration de l'ordre de 60% lorsque le potentiel matriciel atteint les 100 Cbars. Tout comme le tilleul, *Prunus avium* présente des propriétés qui pourraient lui permettre de résister partiellement à la sécheresse.

Ulmus carpinifolia

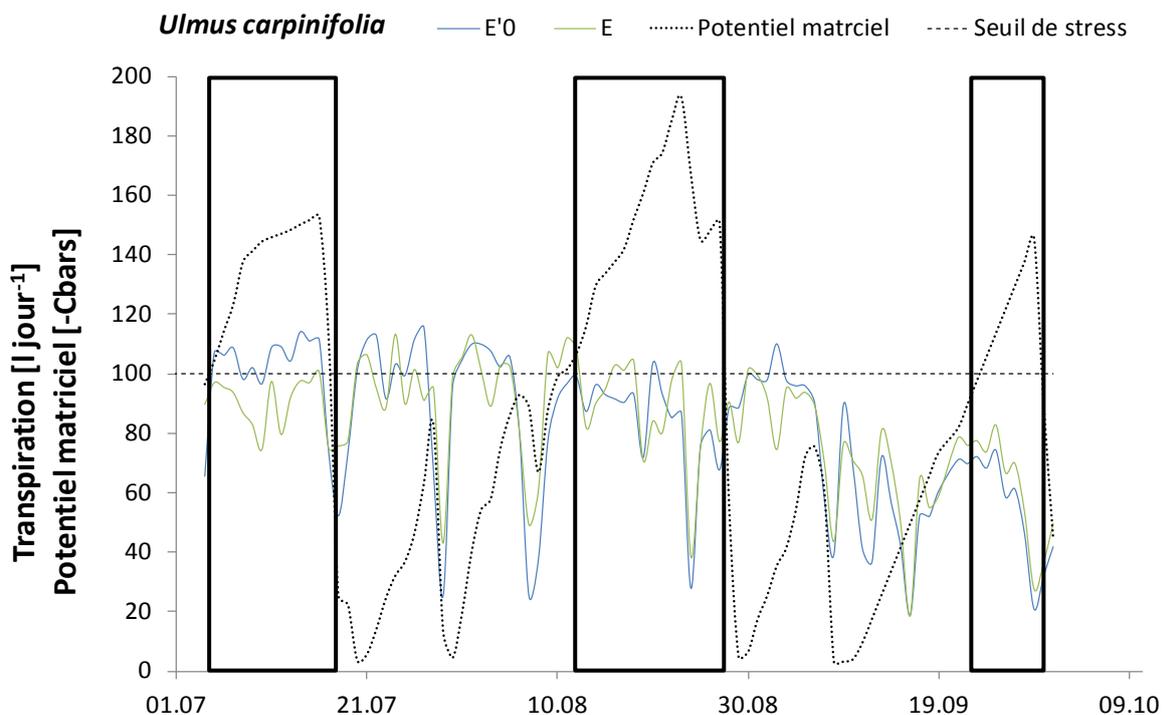


Figure 17. Transpiration journalière mesurée et potentielle d'*Ulmus carpinifolia*, mis en lien avec le potentiel matriciel. En vert : la transpiration mesurée (E), en bleu : la transpiration selon Pereira et al. (2006) (E'_0) et en pointillé le potentiel matriciel. En encadré, les périodes de stress.

Trois périodes de stress hydriques sont également observées chez *Ulmus carpinifolia* (Figure 17). Le cas de l'Orme contrairement au tilleul et au prunus, présente dans une moindre mesure une diminution de transpiration durant la période d'étude. Il est néanmoins

intéressant de se focaliser sur les deux premières périodes de stress hydrique. Durant la première (05 - 16.juillet 2013), une diminution de 23% de E est observée par rapport à E'_0 .

La deuxième période de stress (13 - 23 août 2013) ne reflète aucune nette diminution du taux de transpiration par rapport à celle prévue par E'_0 . Cependant, la corrélation entre les deux approches est faible (r^2 : 0.08) mettant en lumière un potentiel stress ressenti par *U. carpinifolia*.

La période de sécheresse du mois de Septembre, comme pour *P.avium* et *T.cordata*, ne semble pas avoir eu d'influence sur la transpiration de l'arbre.

Celtis australis

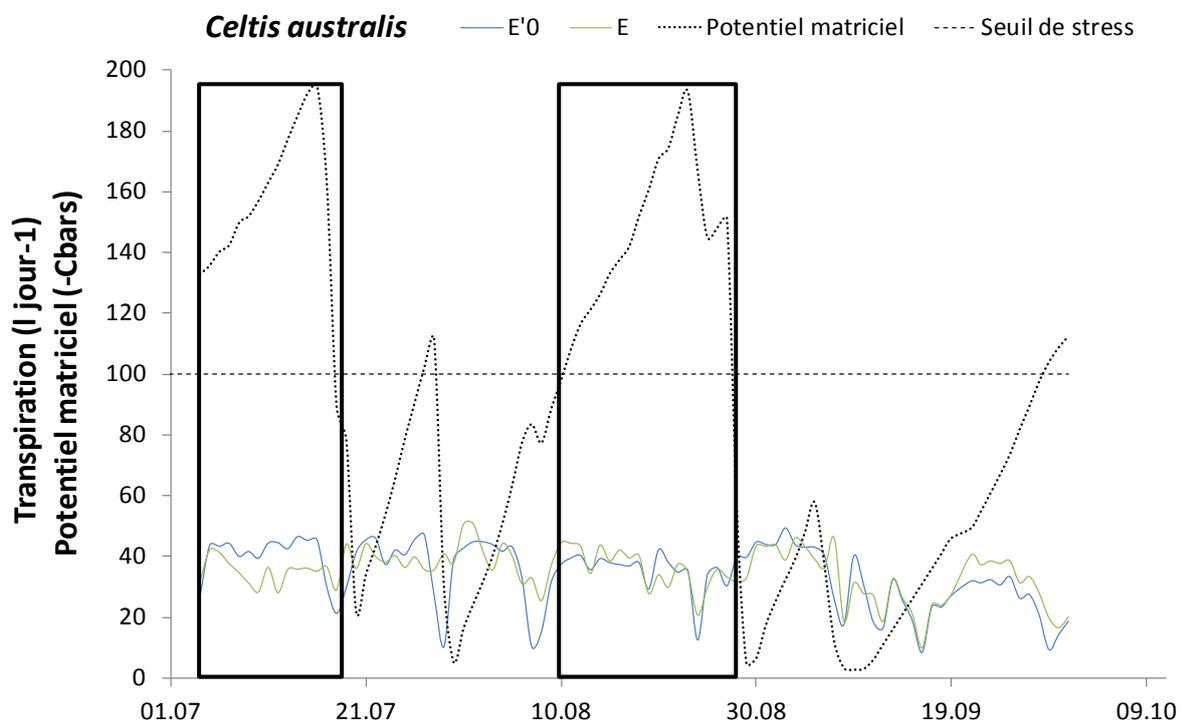


Figure 18. Transpiration journalière de *Celtis australis* comparée à l'estimation de Penman-Monteith, mis en lien avec le potentiel matriciel. En vert : la transpiration mesurée (E), en bleu : la transpiration selon Pereira et al. (2006) (E'_0). En pointillé, le potentiel matriciel. En encadré, les périodes de stress

On enregistre deux principales périodes de stress hydrique dans la fosse de *Celtis australis* (potentiel matriciel > 100 Cbars). Durant la première (04 – 18 juillet) la corrélation entre E et E'_0 est de 0.16 et une baisse de E (-14%) est relevée par rapport à E'_0 .

Durant la seconde période de stress hydrique, une faible corrélation de r^2 : 0.26 est décelée dénotant, ici aussi, l'influence du potentiel matriciel sur la transpiration. Tout comme *U. carpinifolia*, et à l'inverse de *T. cordata* et de *P. avium*, *C. australis* présente un taux de transpiration passablement constant sur toute la période d'étude.

La spécificité du celtis repose sur le fait que même en période d'eau disponible (période I), la corrélation entre E et E'_0 est basse (r^2 : 0.2 du 19 juillet au 11 août) démontrant un stress d'un autre ordre. En période II néanmoins, la tendance s'inverse avec une corrélation entre E et E'_0 de 0.7.

A cela vient s'ajouter une transpiration particulièrement faible sur toute la période d'étude. Effectivement, de par sa morphologie les résultats de transpiration étaient attendus plus proches de la gamme du *Prunus*. Le faible indice foliaire appuie cette constatation. Il est effectivement peu probable que le A_L du *Celtis* soit plus faible que celui des trois autres arbres (principalement du Tilleul) (Tableau 7). Cependant, déterminé par régression, la surface foliaire est directement liée à la transpiration (voir Eq.6). Une faible transpiration, comme chez *C.australis*, induit de ce fait un faible A_L .

Ce faible taux de transpiration peut être le produit de plusieurs problèmes : tel qu'un mauvais ancrage du système racinaire rendant l'accès à l'eau difficile, une surface foliaire réduite ou une physiologie déficiente. Dans notre cas, la dernière hypothèse semble la plus probable. Effectivement, les feuilles du *Celtis* présentent des symptômes de chlorose et sont jaunies sur plus la moitié de la surface (Figure 19), empêchant probablement de ce fait, *C. australis* de transpirer comme prévu par le modèle.



Figure 19. Chlorose sur les feuilles de *C. australis*.

Le cas de *C. australis* ne semble malgré tout pas s'appliquer uniquement à l'arbre étudié. Effectivement, le genre *Celtis* est souvent trouvé, pendant l'été avec des feuilles jaunies, tombantes et une apparence générale faible (Lionel Chabbey, communication personnelle). Cependant, ces arbres ne se développent pas moins bien que les autres essences. Cet aspect peut provenir d'une réponse physiologique de l'arbre à son environnement (carence en nutriments, une mauvaise adaptation de l'essence au climat, etc.). D'autres recherches sont nécessaires pour comprendre les réponses du genre *Celtis* à son environnement.

3.4 Conclusion partielle

En période d'eau disponible, E'_o (estimée par mFAO-Penman-Monteith) reflète parfaitement E (mesurée par les sondes TDP). La comparaison entre les deux approches, nous permet de déceler les périodes de stress lorsque les deux courbes se séparent et/ou ne sont plus corrélées. L'utilisation de sondes *Watermark* nous permet ici d'établir la nature du stress (hydrique ou autre).

Les conséquences du stress hydrique engendrées sur les arbres durant l'été 2013 ne présentent pas d'impact à long terme sur le taux de transpiration de l'arbre. Rapidement après une pluie, ce dernier revient à la norme. De plus, la période de sécheresse du mois de Septembre ne semble pas avoir eu d'incidence sur la transpiration des quatre arbres étudiés. Une des raisons peut provenir du fait que la période de stress hydrique est plus courte que les deux précédentes (juillet/ Août). Son influence sur la transpiration peut donc se trouver réduite. De plus, étant en Septembre, la demande climatique (évapotranspiration) est plus faible. L'arbre a donc la possibilité d'aller puiser dans ses réserves.

Le Tableau 8 somme la transpiration journalière de chacun des arbres sur toute la période d'étude, soit du 13 juin au 15 novembre 2013 donnant une idée globale du taux de transpiration pouvant être mesuré sur la saison de végétation. Ces valeurs sont dépendantes du climat et varient d'une essence et d'une année à l'autre. Le printemps 2013 (de mars à mai) s'est avéré plus froid que la norme (moyenne climatologique de 1981 – 2010) avec environ 1 à 2 degré de moins (8.6 °C contre 10 °C à Genève). La durée d'ensoleillement fut également fortement réduite avec une durée d'ensoleillement de 351 h contre 527 h selon la norme. La pluviométrie par contre est souvent excédentaire par rapport à la norme (297 mm contre 225 mm). Ce climat a entraîné une évolution de la végétation plus tardive que la moyenne.

L'été en revanche fut globalement un des plus chauds depuis 1864 avec un excédent thermique d'environ +0.3 degré sur Genève par rapport à la norme (19.5°C contre 19.2°C). La durée d'ensoleillement en moyenne de 735 h a atteint les 829 h. Les précipitations dans la région du bassin Lémanique ont été de 218 mm contre 252 mm (soit 86% de la norme).

Avec les conditions météorologiques de l'été 2013, les taux de transpiration oscillent entre 5'000 et 12'000 litres sur la période de végétation.

Tableau 8. Somme de transpiration journalière de *Tilia cordata*, *Ulmus carpinifolia*, *Celtis australis* et *Prunus avium* sur une période de 151 jours (145 et 149 pour respectivement *T.cordata* et *C.australis*) soit du 13.juin au 11 Novembre 2013.

Σ transpiration E (L)			
<i>Tilia cordata</i>	<i>Ulmus carpinifolia</i>	<i>Celtis australis</i>	<i>Prunus avium</i>
4'268	11'901	5'939	8'643

3.5 Influence des paramètres environnementaux

Durant la période d'étude, nous avons observé la fluctuation du flux de sève avec celle des facteurs environnementaux : température et humidité relative, radiations solaires, vitesse du vent et précipitations. Les différences entre les jours ensoleillés ou pluvieux sont facilement identifiables et montrent incontestablement l'influence des facteurs climatologiques sur le flux de sève. La Figure 20 montre les variations du flux de sève avec celles du rayonnement solaire sur une période de 10 jours. Le 29 Juillet est caractérisé par de fortes précipitations (83 mm) et une moyenne du rayonnement solaire de 75 Wm^{-2} contre 288 Wm^{-2} les jours précédents induisant une baisse de flux de 63 % (pour *T. cordata*).

Nous avons précédemment montré que l'équation mFAO-PM, en période d'eau disponible, reflétait bien la fluctuation de la transpiration mesurée. Selon cette équation (Eq. 5), les facteurs environnementaux ayant une influence sur la transpiration sont : la température (T), les radiations solaires (R_s), la vitesse du vent (W_s) et le déficit de pression de vapeur (VDP).

L'influence de chaque facteur utilisé dans la formule de Penman-Monteith selon la FAO a été évaluée. Pour ce faire, tous les paramètres sont pris à leur valeur moyenne saisonnière hormis le facteur analysé qui varie. Ceci permet de mettre en évidence l'influence du facteur climatique sur l'équation. La gamme des valeurs utilisées correspond à celles mesurées par la station météorologique sur le site d'étude. Dans nos conditions, tous les facteurs montrent une influence linéaire sur l'équation FAO-PM (Figure 21).

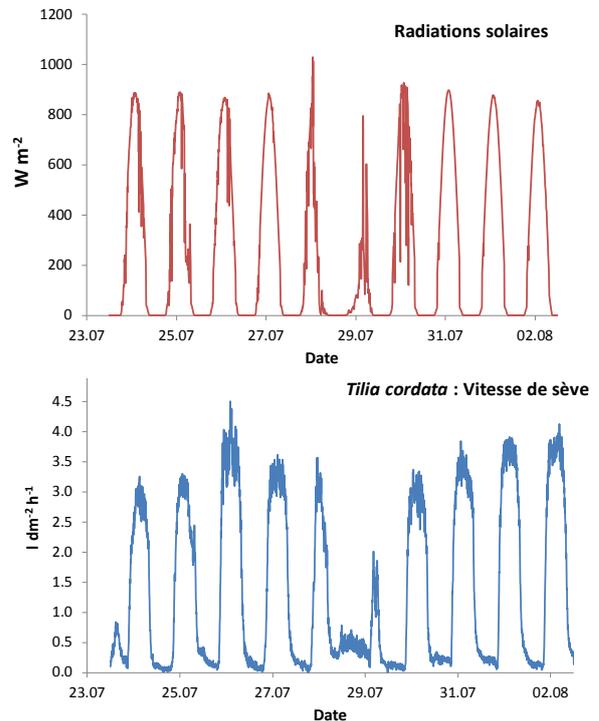


Figure 20. Variations journalières de vitesse de flux rapporté aux radiations solaires.

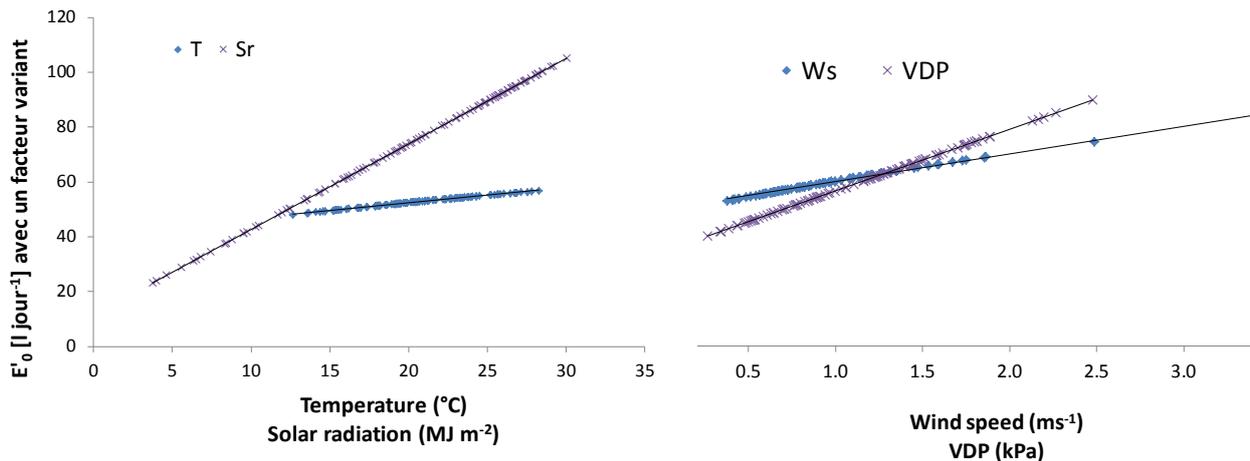


Figure 21. Influence des quatre facteurs climatiques étudiés indépendamment sur l'équation de Penman-Monteith selon la FAO. La relation entre les deux est démontrée en ne faisant varier qu'un seul facteur à la fois dans l'équation et en laissant les autres à leur moyenne saisonnière. T : température, Sr : radiations solaires, Ws : vitesse du vent et VDP : déficit de pression de vapeur.

3.5.1 Régression linéaire multiple

Une première régression linéaire multiple a été effectuée entre la moyenne de transpiration journalière de chaque arbre avec les quatre facteurs environnementaux supposés influents (T, Sr, Ws, VDP) selon la FAO-PM. Ceci, afin de déterminer si ces derniers sont significativement corrélés ($P < 0.05$) à la transpiration. Il s'avère que, d'un arbre à l'autre, les facteurs climatiques ne sont pas tous significatifs. De ce fait, une seconde régression linéaire multiple a été faite avec les seuls facteurs significatifs. Les équations des régressions linéaires ont été utilisées comme modèle permettant de retranscrire E (E_{reg}) en fonction uniquement des paramètres environnementaux, comme le prévoit l'équation de la FAO - Penman-Monteith de façon à vérifier si l'influence des paramètres environnementaux est objectivement significative.

3.5.2 Equations de régressions

Tableau 9. P valeurs de chaque facteur environnemental sur chacun des arbres, déterminant la significativité ($P < 0.05$) de leur influence sur la transpiration, ainsi que les équations de régressions (E_{reg}) retraçant la transpiration mesurée en fonction des paramètres environnementaux montrant une influence significative. NA : non significatif, Sr : radiations solaires, VDP : déficit de pression de vapeur, T : température et Ws : vitesse de vent.

	P valeurs				R^2	Equations de régressions
	Sr	VDP	T	Ws		
<i>T. cordata</i>	0.000	0.004	0.034	NS	61	$E_{reg} = 33.5 - 1.45(T) + 0.0889(Sr) + 18.2(VDP)$
<i>P. avium</i>	0.000	0.001	NS	0.030	86	$E_{reg} = 21.8 + 0.180(Sr) - 8.48(Ws) + 16.5(VDP)$

<i>U. carpiniifolia</i>	0.000	NS	NS	0.035	84	$E_{reg} = 34.1 + 0.263(Sr) - 8.5(Ws)$
<i>C. australis</i>	0.000	NS	NS	NS	53	$E_{reg} = 18.4 + 0.0817(Sr)$

3.5.3 Prédications de Penman versus équations de régression

La comparaison des prédictions quant à l'influence des différents paramètres environnementaux sur la transpiration a été faite en laissant un seul facteur variant et en conservant les autres à leur moyenne saisonnière. Ceci permet d'observer l'influence de chaque facteur indépendamment et de les comparer.

Radiations solaires

Les résultats de E_{reg} montrent une influence positive du rayonnement solaire sur la transpiration comme le prévoit l'équation mFAO-PM (Figure 22). Les deux droites (E'_0 et E_{reg}) suivent la même tendance et opèrent dans une même gamme de valeurs. L'influence des radiations solaires selon les deux approches est très similaire et comparable. Néanmoins, une pente légèrement plus faible est observée pour E_{reg} démontrant une plus faible influence des radiations solaires que ne le prévoit l'équation de Penman-Monteith. De même, l'ordonnée à l'origine est systématiquement plus petite pour E'_0 , indiquant que pour un même taux de radiations, on observera une plus grande transpiration sur E_{reg} que sur E'_0 .

Ici, l'équation de Penman sous-estime la transpiration mesurée.

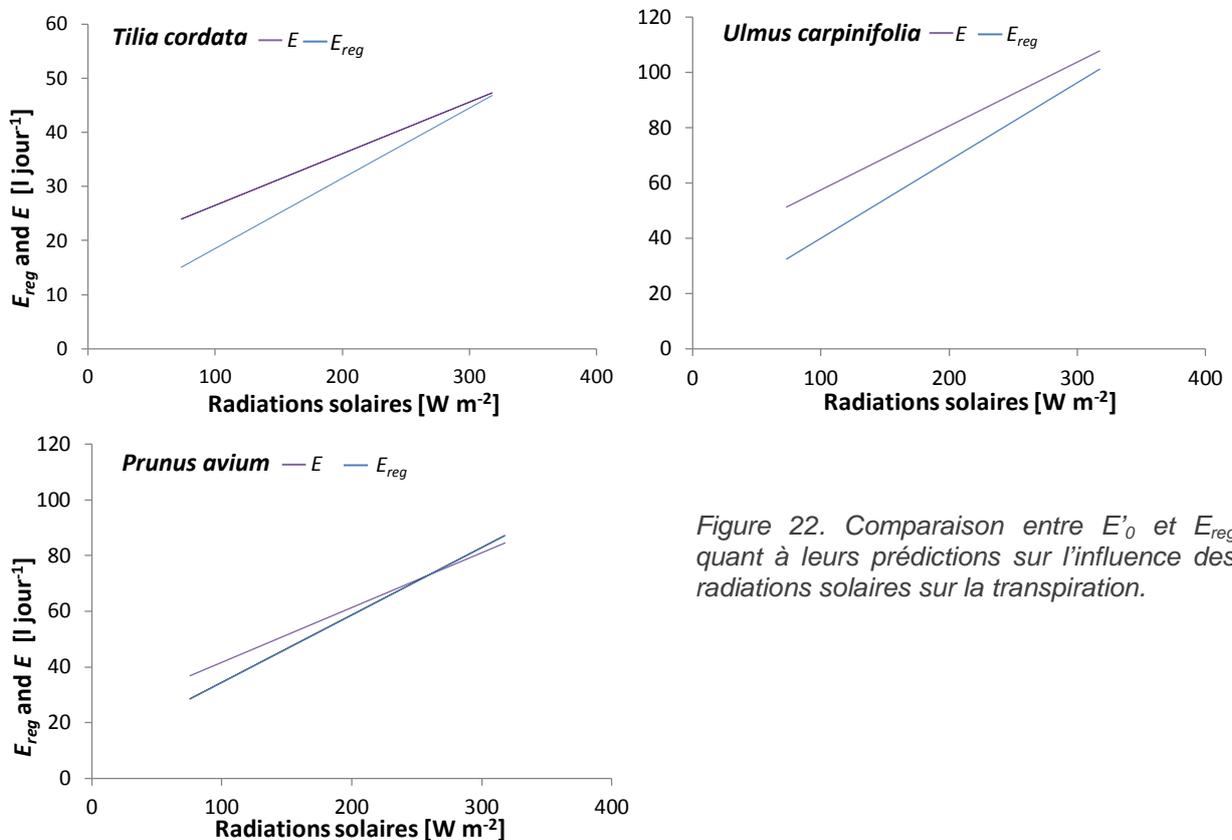


Figure 22. Comparaison entre E'_0 et E_{reg} quant à leurs prédictions sur l'influence des radiations solaires sur la transpiration.

Déficit de pression vapeur

Le déficit de pression de vapeur, tout comme les radiations solaires, présente une influence positive sur la transpiration selon les deux approches (Figure 23). La pente de E_{reg} est plus élevée que ne le propose l'équation mFAO-PM (surtout pour *T.cordata*) indiquant une sous-estimation de l'influence du VDP selon Penman principalement concernant la gamme de valeur les plus hautes.

Selon la régression, le VDP présente une plus grande influence sur E_{reg} que sur E'_0 . L'ordonnée à l'origine des deux droites est proche, suggérant que pour un VDP équivalent, E et E'_0 sont similaires. Les différences augmentent avec le VDP.

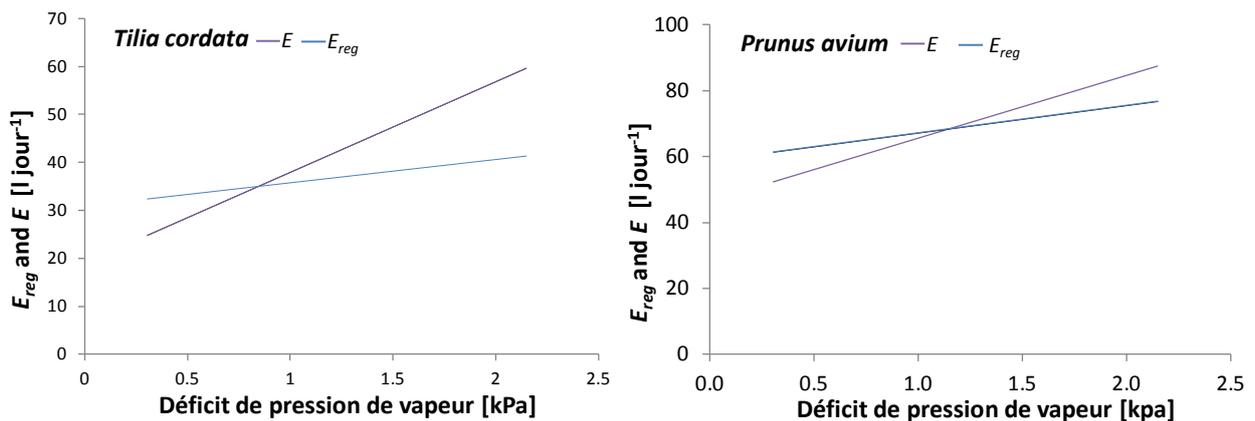


Figure 23. Comparaison entre les équations FAO-PM selon Pereira et al. (2006) et E_{reg} quant à leurs prédictions sur l'influence du déficit de pression de vapeur (VDP) sur la transpiration.

Température et vitesse du vent

La température et la vitesse du vent selon E_{reg} présentent une influence négative sur la transpiration, à l'inverse de l'équation de Penman-Monteith. L'effet est d'autant plus marqué pour la température (Figure 24).

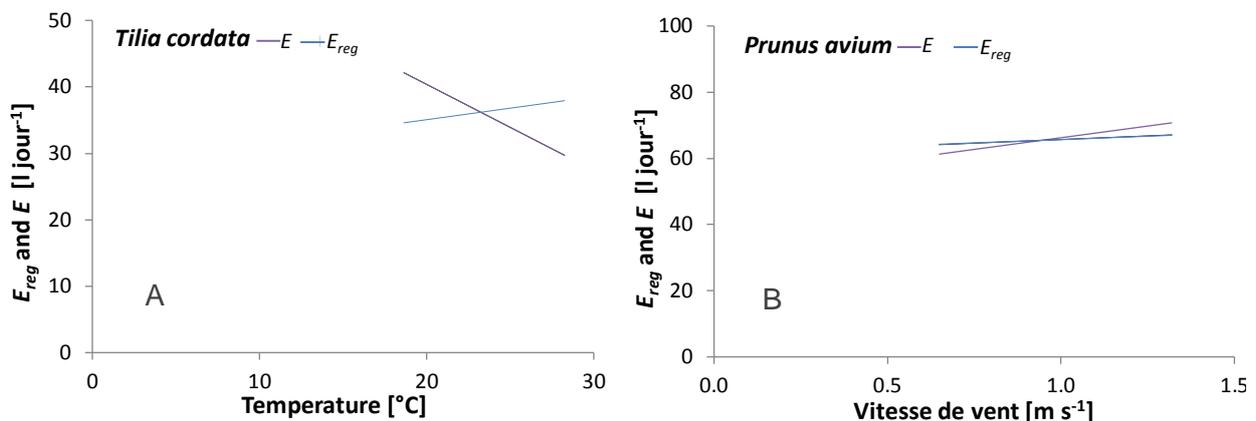


Figure 24. Comparaison entre l'équation de FAO-PM selon Pereira et al. (2006) et les équations de régression linéaire quant à leurs prédictions sur l'influence (A) : de la température et (B) : la vitesse du vent sur la transpiration.

L'influence inverse du vent sur la transpiration peut être expliquée par le fait que ce dernier vient perturber la fine pellicule d'air qui protège les feuilles (*couche limite*). L'augmentation de l'agitation de l'air entraîne l'ouverture des stomates. Cependant, si cette agitation dépasse un certain seuil, elle entraînera leur fermeture, réduisant ainsi la transpiration afin d'éviter des pertes d'eau trop importantes. Le taux de tolérance des arbres varie et il est possible que les spécimens étudiés soit plus sensibles et ferment leurs stomates plus rapidement induisant une influence négative du vent sur la transpiration.

L'influence négative de la température est quant à elle, plus difficile à expliquer et en l'état actuel nous ne formulons aucune hypothèse. Néanmoins, il faut garder à l'esprit que la régression linéaire multiple est un outil statistique mécanistique. Le rayonnement solaire et le déficit de pression de vapeur présentent une influence prépondérante sur la transpiration, le vent et la température sont quant à eux, deux facteurs d'ajustement annexes dans la régression linéaire et peuvent au final avoir une incidence très faible sur les estimations.

Les fortes similarités trouvées entre les deux équations (FAO-PM et régressions multiples) quant à leurs prédictions sur l'influence des facteurs environnementaux sur la transpiration permettent la validation des hypothèses suivantes :

- la corrélation entre E et E'_0 en période d'eau disponible
- et l'influence de chaque facteur indépendamment sur la transpiration.

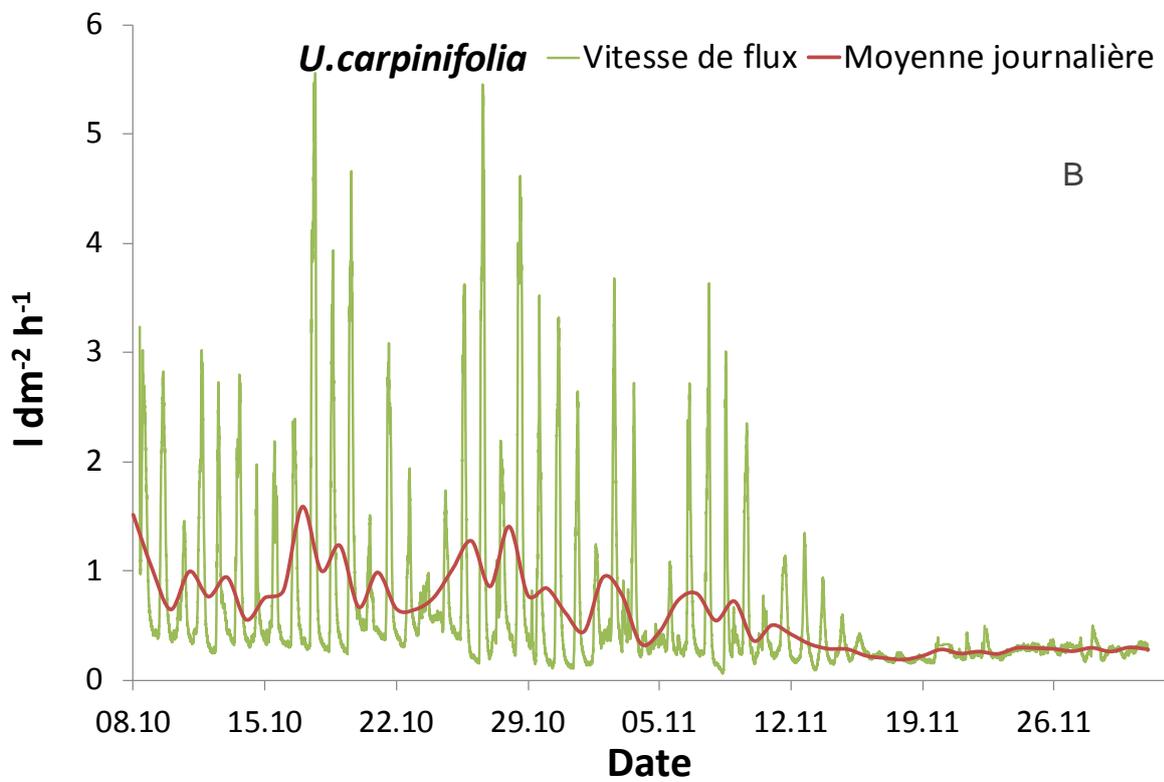
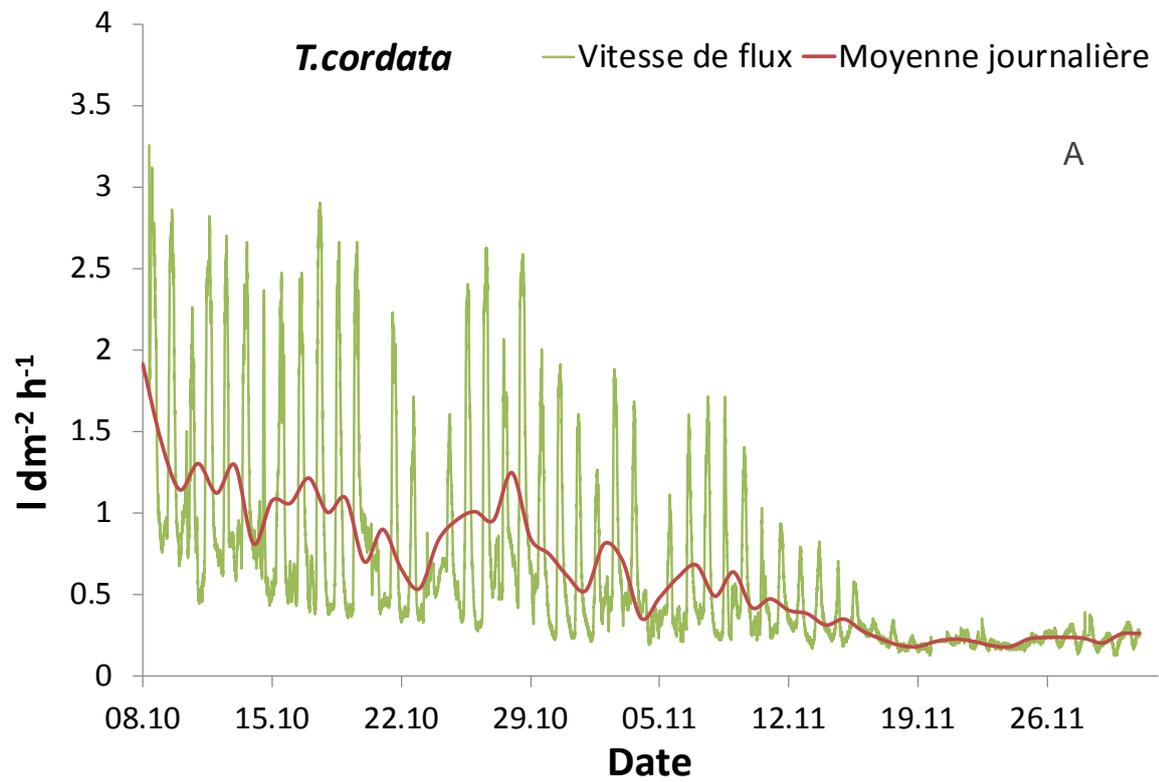
3.6 Descente du flux de sève

Les résultats présentés dans ce chapitre illustrent la descente du flux de sève en fin de saison. Les données proviennent de la moyenne des quatre sondes placées sur chacun des arbres du 08 octobre au 30 novembre 2013 (Figure 25 A, B et C). Seule la descente de sève enregistrée de trois des quatre arbres étudiés de la Plaine de Plainpalais est présentée. Les résultats de *C.australis* ne seront pas discutés, le signal mesuré étant trop bruité. L'utilisation de sondes TDP10, probablement trop petites, fluctuent avec les températures extérieures (fraîches en fin de saison), menant à du bruit sur les données.

Il est intéressant de noter que la baisse de flux semble se faire progressivement de l'extérieur vers l'intérieur du tronc. La vitesse de flux mesurée par les sondes de 30mm diminue plus rapidement que celle mesurée par les sondes de 50mm, comme le démontre la Figure 26.

La descente du flux est graduelle et débute fin octobre pour se stabiliser entre le 15 et le 17 novembre. Cette période correspond à une rapide chute de feuilles dû à une forte bise. Fin novembre, les arbres sont complètement dénudés de feuilles (Figure 27).

La vitesse de flux diminue de l'ordre de 75% de son potentiel saisonnier moyen. Ce faible flux, constant, est maintenu durant la période hivernale ($0.3 \text{ l dm}^{-2} \text{ h}^{-1}$ pour *T.cordata* et *U.carpinifolia* et 0.5 chez *Prunus*).



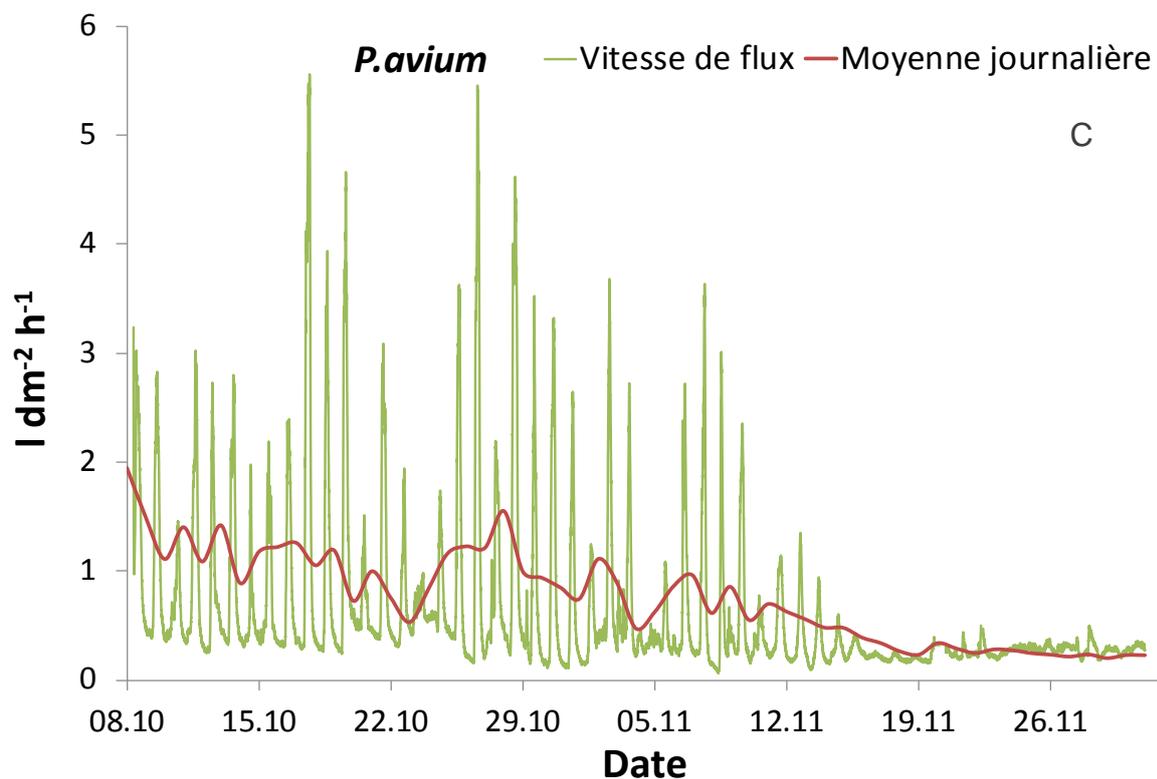


Figure 25. Descente de vitesse de flux de sève, débutant mi-octobre pour se stabiliser mi-Novembre. (A) : *Tilia cordata*, (B) *Ulmus carpinifolia* et (C) : *Prunus avium*

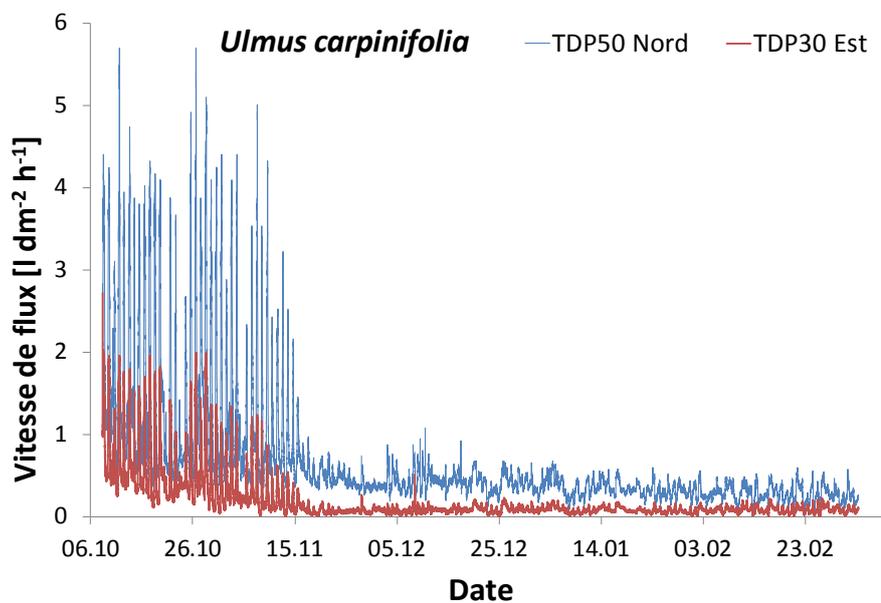


Figure 26. Descente de sève chez *Ulmus carpinifolia*. En rouge, les sondes TDP 30mm et en bleu : les sondes de 50mm.



Ulmus carpinifolia



Prunus avium 'plena'



Celtis australis



Tilia cordata

Figure 27. Photographie datant du 28 Novembre 2013 montrant les quatres étudiés sans feuilles.

3.7 Montée de Sève

Evolution de la couronne foliaire



31.03.14



07.04.14



14.04.14



23.04.14



23.04.13

Figure 28. Apparition des feuilles et évolution de la couronne foliaire chez T.cordata.



31.03.14



07.04.14



14.04.14

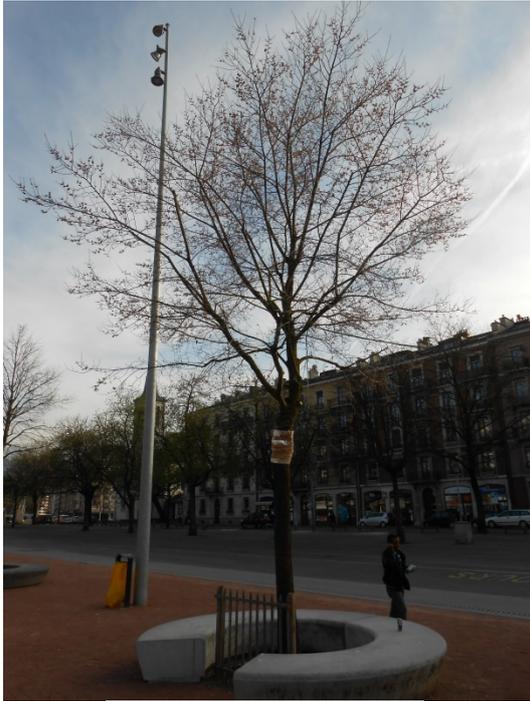


23.04.14



23.04.13

Figure 29. Apparition des feuilles et évolution de la couronne foliaire chez *P.avium*.



31.03.14



07.04.14



14.04.14



23.04.14



23.04.13

Figure 30. Apparition des feuilles et évolution de la couronne foliaire chez *U.carpinifolia*.



31.03.14



07.04.14



14.04.14



23.04.14



23.04.13

Figure 31. Apparition des feuilles et évolution de la couronne foliaire chez *C.australis*.

Les photographies présentant l'évolution de la couronne foliaire au printemps 2014 montrent un développement de la végétation deux à trois semaines en avance sur celui de l'année 2013 (Figure 28 à Figure 31).

Selon météo suisse, les mois de mars-avril 2014 se classent parmi les plus chauds depuis 1864, avec des excédents thermiques compris entre 1 et 2 degrés. A Genève, les températures enregistrées durant ces deux mois sont de 2.6°C supérieures à celle de 2013 (9.8°C en 2014 contre 7.2 °C en 2013). La moyenne des radiations solaires 2014 est elle aussi supérieure avec 186.2 W/m² contre 139.73 W/m². De plus faibles précipitations sont néanmoins enregistrées en 2014 (99.6 mm contre 184.7 mm en 2013). Les conditions météorologiques favorables du printemps 2014 ont favorisé un développement plus rapide de la végétation.

La montée de sève des quatre arbres étudiés coïncide avec l'apparition des feuilles et le débourrement des bourgeons qui émergent la dernière semaine de mars chez *Prunus* et la première semaine d'avril chez les trois autres essences (Figure 32 et Figure 33).

Plus précisément, chez *T.cordata*, la montée de sève est enregistrée entre le 04 et le 06 avril (Figure 34 A) tout comme *U.carpinifolia* (B). Celle de *P.avium* s'observe entre le 28 et le 30 mars (Figure 34 C).

Une surface foliaire importante ne s'avère donc pas nécessaire pour débiter le flux. La montée de sève observée chez ces quatre essences est présentée ci-dessous en l dm⁻² h⁻¹. Ne connaissant pas les valeurs de la surface conductrice à cette période de l'année, les données ne peuvent pas être transformées en données de transpiration. Les valeurs de As 2013 ne peuvent pas être utilisées ne connaissant pas la date à laquelle elles peuvent s'appliquer.

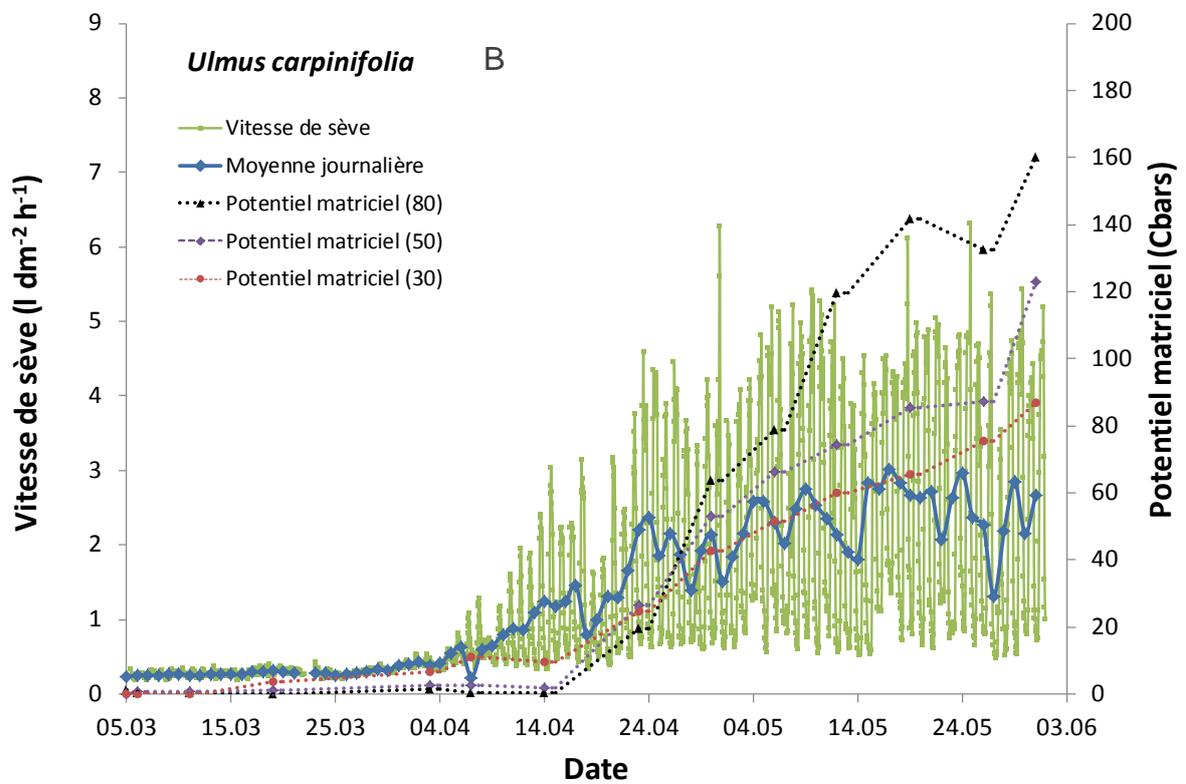
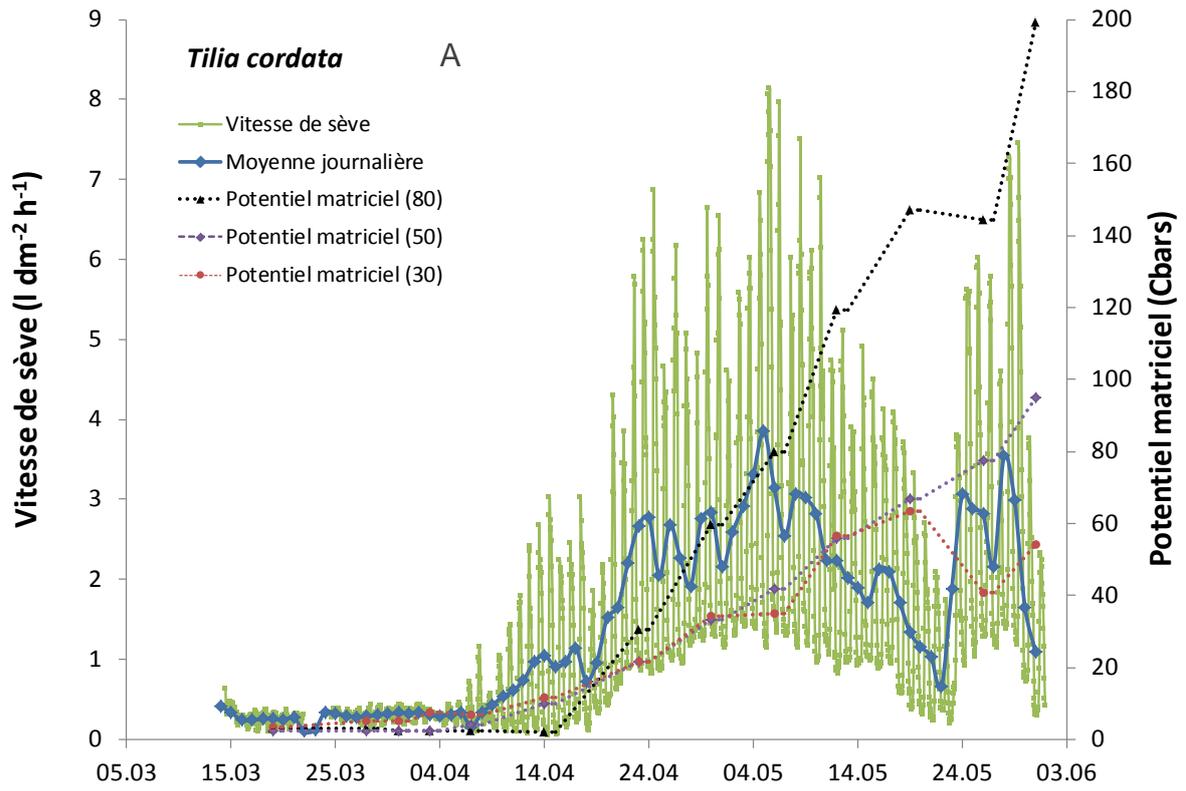
Les mesures du Celtis montrent à nouveau un signal flou ne seront pas discutées ici.



Figure 32. Débourrement des bourgeons chez *T.cordata*.
Photographie prise le 07.04.14.



Figure 33. Débourrement des bourgeons chez *P.avium*.
Photographie prise le 31.03.14.



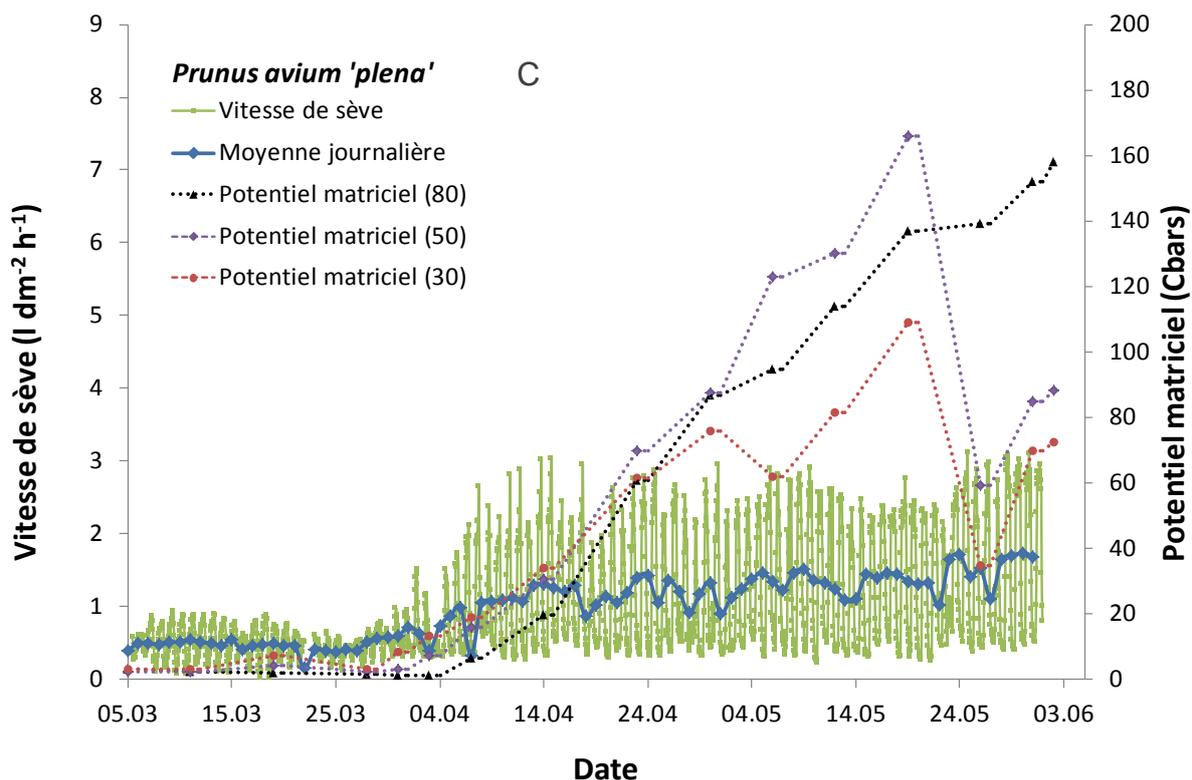


Figure 34. Montée de sève enregistrée chez (A) *Tilia cordata*, (B) *Ulmus carpiniifolia* et (C) *Prunus avium* débutant début avril.

En ce début de saison, les maximums de vitesse de sève ($l\ dm^{-2}\ h^{-1}$) sont importants et dépassent ceux enregistrés l'année 2013 (hormis *P.avium*) (Tableau 10). Les pics sont principalement enregistrés début mai. En comparant les données météorologiques (2013/2014) du mois de mai, nous observons des conditions climatiques différentes. En effet, le mois de mai 2013, au même titre que les mois de mars avril, est plus frais ($12.36\ ^\circ C$), moins ensoleillé ($205\ W/m^2$) avec des précipitations plus fréquentes (121 mm) que celui de 2014 qui enregistre une moyenne de température de $15\ ^\circ C$, un rayonnement de $252\ W/m^2$ et de plus faibles précipitations (89 mm) (Météo Suisse). Les maximums enregistrés en mai 2014 sont donc vraisemblablement dus aux conditions météorologiques plus favorables.

Le suivi Watermark montre une augmentation du potentiel matriciel concordant avec le début de la montée de sève. Il est intéressant de relever le stress hydrique observé chez *T.cordata* du 15 au 22 mai 2014 où, comme il a été constaté en 2013, le flux diminue graduellement sa vitesse passant d'une moyenne 1.87 à $0.59\ l\ dm^{-2}\ h^{-1}$ (soit -70%) lorsque le potentiel matriciel dépasse le seuil des 100 Cbars).

La comparaison entre la fluctuation journalière du flux de sève et celle estimée par l'équation de FAO – PM permet à nouveau de déceler les périodes de stress hydrique. Cette dernière débute le 12.05.14 et se poursuit jusqu'à la fin de la période d'étude (31.05.14). Durant cette période, la chute du flux de sève chez *T.cordata* démontre le stress ressenti par l'arbre. Le coefficient de corrélation durant cette période chute à 0.09 contre 0.44 en période d'eau disponible en début de saison (21.04.14 – 11.05.14).

Aucune autre diminution de flux n'est relevée chez les deux autres essences malgré un potentiel matriciel dépassant le seuil de stress hydrique. Ce comportement est étonnant venant de *P.avium* qui au cours de l'été 2013, diminuait son flux lorsque le seuil de 100 Cbars était dépassé, sur cette période même si il n'y a pas une diminution du flux, la corrélation entre les deux méthodes diminue en passant de 0.74 à 0.39 entre le 17.04 et le 11.05.

Chez *U.carpinifolia* la corrélation entre les deux méthodes est similaire en période d'eau disponible comme en période de sécheresse (r^2 : 0.6) en ce début de saison.

L'utilisation de la formule de la FAO- Penman-Monteith a permis aussi de déterminer, le moment à partir duquel le flux de sève et l'équation de FAO – PM deviennent corrélés. Il apparait que les deux approches ne concordent que plusieurs jours après le début de la montée de sève. Chez *Prunus avium* la corrélation devient *bonne* (r^2 :0.6) à partir du 08.04. Chez *Tilia cordata* (r^2 : 0.44) et *Ulmus carpinifolia* (r^2 : 0.6) la corrélation débute le 21.04 et le 17.04 respectivement.

Le Tableau 10 compare les moyennes et maximums enregistrés sur les deux saisons de végétations 2013/2014. Les conditions climatiques du printemps 2014 semblent avoir un effet favorable, permettant de plus hautes moyennes journalières enregistrées chez *T.cordata* et *U.carpinifolia*. Ceci n'est cependant pas le cas de *Prunus avium* qui montre des valeurs plus faibles en début de saison 2014. Les comparaisons restent néanmoins difficiles car les périodes d'étude ne se couvrent pas : juin - octobre 2013/ avril – mai 2014.

Tableau 10. Comparaison 2013/2014 des vitesses de flux mesurés sur chacune des quatre essences. Les résultats présentés proviennent de la moyenne de la totalité des sondes sur chacun des arbres. Les données de 2014 proviennent des deux premiers mois suivant la montée de sève (Avril-Mai).

L dm ⁻² h ⁻¹	Moyenne journalière		Maximum journalier		Maximum horaire	
	2013	2014	2013	2014	2013	2014
<i>T. Cordata</i>	0.98	1.35	1.72	3.69	5.47	8.15
<i>U. Carpinifolia</i>	1.06	1.33	1.5	3.02	3.9	6.32
<i>P. avium</i>	1.11	0.99	1.83	1.74	5.21	3.31

4. Discussion Générale

Les études de plantations urbaines considérant les trois niveaux de l'arbre : le sol, sa physiologie et son environnement climatique sont très rares dans la littérature. Cette étude permet une vision globale du comportement des arbres dans leur environnement. Cette étude est la première, à notre connaissance, à comparer des données de flux de sève à celles proposées par Penman-Monteith pour des arbres urbains non-irrigués.

4.1 Penman-Monteith

L'équation de Penman-Monteith selon la FAO (Eq. 4) s'avère très utile et le facteur de correction proposé par Pereira et al. (2006) paraît être une bonne solution pour l'évaluation de la transpiration des arbres. En période d'eau disponible, la transpiration mesurée par des sondes TDP (E) et celle estimée par Eq.5 (E'_0) sont très similaires.

Pour une bonne corrélation, en période d'eau disponible, une augmentation de la surface foliaire a été nécessaire. L'évolution de la couronne foliaire au cours de la saison est en effet indéniable. Breda (1999), décrit la dynamique saisonnière des arbres caduques passant d'un stade hivernal sans feuille à un stade feuillu pour finalement atteindre un maximum mi-août (Figure 35). Ceci confirme le besoin d'augmenter d'environ 30% la surface foliaire de chacun des arbres du mois de Juillet au mois d'Août.

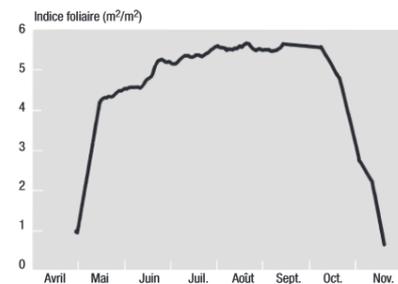


Figure 35. Evolution saisonnière de la surface foliaire (m^2/m^2) de chêne. Breda, 1999.

4.2 Méthode du flux de sève et évaluation de la transpiration

La méthode de mesure du flux de sève par des sondes TDP s'avère appropriée pour la mesure de la transpiration des arbres en milieu urbain.

Néanmoins, utilisée seule, cette méthode ne permet pas toujours la détection de stress. C'est effectivement au travers de sa comparaison avec l'équation mFAO – PM et de l'estimation du potentiel matriciel du sol que les stress peuvent être détectés. Nous avons montré que chaque arbre réagit différemment :

- *T. cordata* et *P. avium* ont des comportements similaires face au stress hydrique (semi-résistance). Les deux arbres apparaissent comme ceux ayant le plus « souffert » du stress hydrique (durant l'été 2013) avec une nette diminution de leur transpiration (environ – 60%) lorsque le potentiel matriciel est supérieur à 100 Cbars
- *U. carpiniifolia* a globalement un flux constant sur la période d'étude également en période de stress hydrique.
- La mesure du flux chez *C. australis* a permis de mettre en avant un stress physiologique (chlorose) entraînant une faible transpiration sur toute la période d'étude.

Les conclusions développées ici peuvent en aucun cas être généralisées à l'essence de l'arbre. Aucun réplica n'a été fait dans ce projet et les résultats ne peuvent être appropriés à la spécificité d'une essence.

Néanmoins, le comportement face au stress hydrique de *T.cordata*, et *U. carpinifolia* semble en adéquation avec ce que l'on peut trouver dans la littérature. Köcher et al (2008) étudiaient la relation entre le flux de sève et le taux d'humidité du sol de cinq essences dont *T.cordata*. Les résultats de cette étude ont montré que *T. cordata* diminuait son flux de moitié entre 80 et 180 Cbars. Ces résultats sont très similaires à ce qui a pu être observé au cours de cette étude.

Ulmus carpinifolia est un bois à anneaux poreux (*ring-porous wood*) à l'inverse des trois autres arbres étudiés qui sont des bois à pores diffus (*diffuse-porous wood*), et sa transpiration est trouvée constante au cours de l'étude. Hölscher et al. (2005) dans leur étude sur les effets de la sécheresse sur cinq espèces concomitantes, trouvaient des résultats similaires. *Fraxinus excelsior*, un bois poreux, diffère dans ses résultats quant à son comportement face au stress hydrique. Aucune diminution de flux n'a été relevée entre 80-100 Cbars. L'argument mis en avant par les auteurs est la possibilité d'une forte abondance racinaire facilitant l'absorption de l'eau du sol, réduisant ainsi les risques de stress hydriques.

D'une autre part, les arbres à bois poreux ont une anatomie permettant un mouvement rapide de la sève dans les vaisseaux du bois initial (large diamètre) en période d'eau disponible. Les vaisseaux de bois final permettent eux une prise plus lente du flux mais sont plus résistants à la cavitation. Ces derniers prendraient donc la relève en période de sécheresse (Abrams, 1990). Les espèces à bois poreux résisteraient plus facilement à la sécheresse que les autres.

Pour finir, *U.carpinifolia* a le plus faible maximum de vitesse de sève. Ceci peut démontrer une meilleure gestion des flux avec un meilleur contrôle de l'eau, même en période de forte demande climatique. Il est envisageable qu'*U.carpinifolia* présente une meilleure gestion de ses ressources en eau.

La transpiration est une des clefs pour justifier un bon développement des arbres en milieu urbain. De bons résultats sont trouvés concernant *P.avium*, *T. cordata* et *U.carpinifolia*, confirmant leur bon établissement dans un environnement approprié. Des études plus poussées sur *C. australis* pourraient permettre de mettre en évidence ses difficultés d'implantation en milieu urbain.

4.3 Suivi de l'état hydrique du sol

Le premier facteur influant sur la transpiration des arbres est indéniablement la disponibilité en eau du sol. Nous avons effectivement pu observer ces effets sur *T.cordata* et *P.avium* induisant une nette diminution de la transpiration. Cette étude a permis de mettre en lumière les différentes réponses des arbres face au stress hydrique. Malgré le fait que ces dernières ne peuvent être attribuées à l'essence, il est intéressant de voir les différents comportements que peuvent présenter les arbres d'un même milieu face à la sécheresse.

L'utilisation de sondes *Watermark* dans cette étude confirme que la diminution de transpiration est effectivement associée à un manque d'eau du sol. Elle nous permet également de confirmer qu'en quatrième année, le seuil d'arrosage se trouve au-dessus de 100 Cbars (pour une plantation dite autonome). Une fois ce seuil atteint, une nette baisse de flux est observée, du moins chez *T.cordata* et *P.avium*. Il est aussi intéressant de noter que de manière générale, le potentiel matriciel augmente d'environ 10 Cbars par jour. Les jours de forte demande climatique ce dernier peut se voir augmenter de 25 Cbars. Cette information peut être importante (pour des plantations sous irrigation) quant au délai entre la mesure du potentiel matriciel et celui de l'arrosage en été, lors de forte demande climatique.

Notons aussi que les stress hydriques sont principalement ressentis durant les mois de juillet et août. Au contraire, les périodes de déficits hydriques en septembre ne semblent pas avoir eu d'influence majeure sur le taux de transpiration.

Utilisé seul, ce matériel ne permet malgré tout qu'une analyse globale de l'état hydrique du sol et ne renseigne en aucun cas de l'état hydrique de l'arbre.

4.4 Influence des paramètres environnementaux

Les équations de régression linéaire multiple confirment l'équation de Penman-Monteith. Le rayonnement solaire présente une influence positive sur E pour les quatre arbres étudiés ; le déficit de pression de vapeur joue également un rôle important sur la variation de la transpiration.

D'un point de vue gestion de plantation, l'étude des facteurs environnementaux montrent des résultats intéressants. Le principal paramètre influant sur la transpiration étant le rayonnement solaire, le choix de l'emplacement de la plantation semble donc ici, comme primordial. Les arbres placés à l'ombre verraient leur taux de transpiration nettement diminuer. Des études sur le sujet seraient néanmoins nécessaires.

4.5 Bilan annuel : Descente et montée de sève

Le suivi du flux de sève sur une année complète a permis une meilleure vision des cycles annuels de flux et de transpiration. La *descente* de flux se produit fin octobre pour atteindre son minima hivernal mi-novembre. Cette dernière est synchrone à la chute des feuilles et se fait graduellement de l'extérieur vers l'intérieur du tronc. Un faible flux interne est maintenu à l'intérieur de l'arbre durant l'hiver.

La *montée* de sève quant à elle débute avec le débourrement des bourgeons et dès l'apparition des premières feuilles. Les moyennes et les maximums enregistrés au printemps 2014 sont plus élevés que ceux de l'été 2013 (hormis chez *P.avium*), ceci probablement dû aux conditions climatiques plus favorables (augmentation de la température et du rayonnement solaire).

La finalité de ce travail est d'avoir une meilleure compréhension du comportement des arbres en milieu urbain dans le but d'améliorer leur gestion et d'assurer leur bonne

implantation dans cet environnement complexe et restrictif. Nous avons vu que le taux de transpiration de trois arbres sur quatre semble bon, indiquant leur bonne implantation et un environnement de plantation adéquat. La mesure et l'étude de la transpiration comme détecteur de la *santé* des arbres semble être une méthode adéquate car elle permet effectivement de mettre en lumière les arbres rencontrant des difficultés (ex : *Cetils australis*).

Des différences en termes de transpiration journalière et entre espèces sont observées. Le facteur *espèce* est donc important à considérer. En admettant que tous les arbres sont dans un même environnement, avec les mêmes apports en eau et subissant les mêmes contraintes environnementales, les différences observées entre les arbres proviennent de différences physiologiques. Il n'est néanmoins pas possible dans cette étude de déterminer si ces différences sont dues à l'essence ou à l'arbre en particulier.

L'étude menée ne semble pas avoir eu d'influence sur la croissance des arbres. Effectivement, malgré une chute de 35% du grossissement des troncs par rapport à 2012, une augmentation du diamètre de 2.5 à 4 cm est néanmoins satisfaisante. Cette baisse est assimilée aux périodes de sécheresses auxquelles ont dû faire face les arbres de la plaine de Plainpalais. La comparaison avec les résultats de la croissance circonférentielle de l'année prochaine serait néanmoins plus pertinente.

5. Conclusions et perspectives

En période d'eau disponible, la transpiration estimée selon l'équation de Penman-Monteith selon la FAO (E'_0), montre une forte corrélation avec la transpiration mesurée (E). Pour une entente entre les deux méthodes, la calibration par l'indice de surface foliaire (A_L) est néanmoins indispensable, confirmant la méthode proposée par Pereira et al. (2006).

La méthode du flux de sève, dont les résultats ont été confirmés par la bonne corrélation avec l'équation de Penman-Monteith selon la FAO, apparaît comme une méthode adéquate pour l'étude de la transpiration d'arbres urbains. Cependant, utilisée seule, cette méthode ne permet pas dans tous les cas la détection de stress étant donné que ces derniers sont détectés lors de la séparation et/ou non corrélation entre E et E'_0 .

La comparaison entre ces deux approches est effectivement la méthode qui semble le mieux convenir et qui constitue un parfait instrument pour la détermination de la transpiration, d'indice foliaire et de stress.

Lié au potentiel matriciel, le suivi de la transpiration permet une bonne compréhension des réponses des arbres face aux stress hydriques en confirmant qu'une baisse de flux est effectivement due à une période sèche. Cette méthode, utilisée seule ne permet cependant qu'une vision très globale.

Les équations de régressions (retracant la transpiration comme fonction de facteurs climatiques) ont montré une influence quasiment identique des facteurs environnementaux à ceux prévu par l'équation de Penman-Monteith selon la FAO. La transpiration dans cette étude est révélée comme fortement dépendante du rayonnement solaire et du déficit de pression de vapeur.

L'étude de transpiration sur une année complète a permis le suivi de la descente et de la montée de sève en fin et début de saison nous donnant une vision globale des cycles annuels de transpiration.

Perspectives

Les perspectives de ce travail sont nombreuses. Ce projet étant le premier du genre il ouvre les portes à de multiples études sur les plantations urbaines. Il serait tout d'abord intéressant de mener une étude similaire à celle-ci mais sur plusieurs arbres de même essence, nous permettant d'attribuer les types de réponses physiologiques à une espèce en particulier ou l'arbre lui-même. De plus, étudier des plantations de plusieurs âges différents serait aussi une possibilité afin de voir l'évolution du taux de transpiration en fonction de l'âge de la plantation.

La méthode employée dans cette étude peut être utilisée sur des plantations à *problèmes* pour permettre une meilleure compréhension des difficultés rencontrées par l'arbre permettant la mise en place de solutions appropriées.

L'utilisation de la tomographie par impédance électrique montre des résultats intéressants qui méritent d'être approfondis. Le suivi continu de la distribution de l'eau dans le tronc,

comme la compréhension des facteurs l'influençant, serait passionnante. De plus, en couplant cette étude avec l'utilisation de sondes TDP, supposées refléter la distribution de l'eau dans l'arbre, serait d'un grand intérêt.

Dans tous les cas, l'étude des plantations urbaines est un domaine encore neuf, qui mérite une attention toute particulière étant donné l'influence et l'impact des arbres en ville. De nouvelles études devraient être menées sur le sujet.

Références bibliographiques

Abrams Marc D. (1990) Adaptations and responses to drought in Quercus species of North America. *Tree Physiology* **7**, 227-238.

Allen R.G., Pereira S.L., Raes D. and Smith M. (1998) Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirement-FAO Irrigation and drainage paper 56. *FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations*. pp. 1-15.

Brazee N.J., R.E. Marra, L. Göcke and P. Van Wassenae (2010) Non-destructive assessment of internal decay in three hardwood species of northeastern North America using sonic and electrical impedance tomography. *Forestry* **84**.

Breda N. (1999) L'indice foliaire des couverts forestiers: Mesure, variabilité et rôle fonctionnel. *Revue Forestière Française* **2**: 135-150.

DGNP- Direction générale de la nature et du paysage- (2013), Service arbres et nature en ville : Direction concernant la plantation et le suivi des arbres, 20 p.

Gillig C-M., C. Bourgery and N. Amann (2008) L'arbre en milieu urbain: conception et réalisation de plantations. Infolio, Ecole d'ingénieurs de Lullier, 216 p

Granier A.(1985) Une nouvelle méthode pour la mesure du flux de sève brute dans le tronc des arbres. *I.N.R.A.-C.R.F., Station de sylviculture et de production*, 193-200.

Guinaudeau (2010) L'arbre en milieu urbain: choix, plantation et entretien, *CSTB*.

hepia (2012), Rapport annuel du suivi de plantation : Plaine de Plainpalais : étape 2. laboratoire sols et substrats, 16p.

Hölscher D., O.Koch, S. Korn and Ch. Leuschner (2005) Sap flux of five co-occurring tree species in a temperate broad-leaved forest during seasonal soil drought. *Trees* **19**:628-637.

Köcher P., T.Gebauer, V.Horna and Ch. Leuschner (2009) Leaf water status and stem xylem flux in relation to soil drought in five temperate broad-leaved tree species with contrasting water use strategies. *Annals of Forest Science* **66** 101

Konopacki S. and Akbari H. (2001) Energy Impacts of Heat Island Reduction Strategies in the greater Toronto area. *Lawrence Berkeley National Laboratory*.

Krööt A., A Söber, W.Hartung and Ü. Niinemets (2004). Drought acclimation of two deciduous tree species of different layers in a temperate forest canopy. *Trees* **18**:93-101.

Manusset S (2012) Impacts psycho-sociaux des espaces verts dans les espaces urbains. - Point de Vue - *Développement durable et territoires* [consulté en juin 2014 sur <http://developpementdurable.revues.org/9389>], Vol. **3** n° 3.

Peper P.J., E.G. McPherson and S.M. Mori (2001) Equations for predicting diameter, height, crown width and leaf area of San Joaquin Valley street trees. *Journal of Arboriculture* **27**(6).

Pereira A.R., Green S. and Villa Nova N.A. (2006) Penman-Monteith reference evapotranspiration adapted to estimated irrigated tree transpiration. *Agricultural water management* **83**: 153-161.

Rosignol J.P, O. Damas, A. Bensaoud and X. Marié (2007) Les mélanges terre-pierre: Caractéristiques morphologiques et analytiques. *Journées Nationales de L'Etude des sols*, Angers.

Ruepp N. (2010) Utilisation de capteurs par dissipation de chaleur (TDP) pour la mesure du flux de sève sur *Celtis australis*. Thèse de Bachelor, Haute école du paysage, de l'ingénierie et d'architecture (hepia) de Genève.