

Estimation de la transpiration de pommiers sous climat semi-aride, par la mesure du flux de sève brute

Zouhair Nasr^{a*}
Imed Ben Aissa^b
Netij Ben Mechliab

^a Institut national
de la recherche agronomique
de Tunisie,
rue Hedi-Karay,
2049 Ariana,
Tunis, Tunisie

^b Institut national
agronomique de Tunisie,
43, avenue Charles-Nicolles,
1002 Belvédère,
Tunis, Tunisie

Evaluating the transpiration rate of apple trees grown in a semi-arid climate using sap flow measurements.

Abstract — Introduction. To avoid any prolonged water stress on fruit trees grown in semi-arid zones, ideally one should measure the transpiration rate and analyze its progression while taking into account various external factors. An experiment was conducted in the Tunis area. It was designed to evaluate the daily transpiration of the trees, to analyze the transpiration relationship with definite micro-climatic conditions, and to develop a reference model using sap flow measurements for estimating the transpiration of the orchard. **Materials and methods.** Micro-climatic and leaf potential measurements were regularly recorded on a 9 year-old trickle irrigated apple orchard (cv. Golden delicious) totalling 1,250 trees per ha. Heat dissipation sensors were used to measure the sap flow of two trees during fruit setting. The transpiration of the apple orchard was calculated by counterbalancing the sap flow with the leaf weight of the trees analyzed. **Results and discussion.** The transpiration daily kinetics appeared to depend on the total radiation. With a radiation exceeding 500 W, the transpiration rate and water potential show cyclical variations reflecting the stomata behavior under demanding evaporative conditions. The transpiration of the orchard correlates closely with the evapotranspiration calculated according to the Penman-Monteith equation ($r^2 = 0.75$) but less so with the daily average temperature ($r^2 = 0.41$). **Conclusion.** These preliminary results show how essential sap flow measurements are. They help to understand the mechanisms of water transfers through the tree and are useful for measuring the transpiration rate. These data will have to be confirmed with further experiments. (© Elsevier, Paris)

Tunisia / *Malus* / semi-arid climate / transpiration / sap flow / mathematical models

Estimation de la transpiration de pommiers sous climat semi-aride, par la mesure du flux de sève brute.

Résumé — Introduction. Pour éviter le stress hydrique prolongé d'arbres fruitiers en zones semi-arides, il faudrait pouvoir quantifier leur transpiration et en étudier l'évolution en fonction de certains facteurs du milieu physique. Une expérimentation, menée dans la région de Tunis, a cherché à évaluer la transpiration journalière des arbres, à lier son évolution à certains éléments microclimatiques et à développer un modèle permettant d'estimer la transpiration du verger à partir de la mesure de flux de sève brute. **Matériel et méthodes.** Un verger de pommiers (cv. Golden delicious) âgés de 9 ans, à 1 250 arbres-ha⁻¹, et irrigué au goutte-à-goutte a permis d'effectuer régulièrement des mesures microclimatiques et de potentiel foliaire. Le flux de sève brute de deux arbres a été mesuré par capteurs thermiques à dissipation de chaleur pendant le stade de nouaison des fruits. La transpiration du verger a été calculée en pondérant le flux de sève par la masse foliaire des arbres étudiés. **Résultats et discussions.** La cinétique journalière de la transpiration est apparue liée au rayonnement global. Lorsque celui-ci est supérieur à 500 W, la transpiration et le potentiel hydrique présentent des variations cycliques reflétant le comportement des stomates en conditions de forte demande évaporative. La transpiration du verger est bien corrélée à l'évapotranspiration calculée avec l'équation Penman-Monteith ($r^2 = 0,75$) ; elle l'est moins avec la température moyenne journalière ($r^2 = 0,41$). **Conclusion.** Les résultats préliminaires obtenus montrent l'intérêt de la mesure du flux de sève pour comprendre les mécanismes des transferts hydriques à travers l'arbre et quantifier la transpiration. Ils devront être complétés à partir d'expérimentations plus approfondies. (© Elsevier, Paris)

* Correspondance et tirés à part

Reçu le 9 septembre 1997
Accepté le 18 décembre 1998

Fruits, 1999, vol. 54, p. 271–276
© Elsevier, Paris

RESUMEN ESPAÑOL, p. 276

Tunisie / *Malus* / climat semi-aride / transpiration / flux de sève / modèle mathématique

1. introduction

En milieu semi-aride, la demande évaporative climatique peut atteindre des valeurs assez fortes pouvant impliquer un stress hydrique plus ou moins long, pouvant être observé même en condition d'apports hydriques importants. Pour prévenir de telles situations de stress prolongé, il apparaît donc nécessaire de quantifier la transpiration des arbres et d'en étudier l'évolution en fonction de certains facteurs du milieu physique.

Du point de vue méthodologique, les approches basées sur des bilans de masse au sol ou d'énergie ne sont pas applicables pour les arbres. En effet, par sa forte rugosité et sa discontinuité dans le système sol-atmosphère, un verger présente une structure hétérogène. Les méthodes utilisées pour évaluer les transferts hydriques des couverts homogènes ne sont pas alors applicables, mais celles qui sont basées sur la mesure du flux de sève dans les troncs permettent de contourner ces difficultés et d'évaluer la transpiration avec une bonne précision. Pour cette raison, un grand effort a été entrepris au cours de ces dernières années pour développer de telles techniques utilisant l'impulsion de chaleur [1], le bilan de chaleur [2–4] ou la dissipation de chaleur [5, 6] et concevoir, notamment, des capteurs thermiques fiables. D'autres recherches visent par ailleurs à mieux estimer la transpiration d'un verger à partir de mesures individualisées.

Afin de tester une méthodologie permettant d'évaluer la transpiration d'un verger de pommiers, une expérimentation a été menée dans la région de Tunis. Elle visait a) à évaluer la transpiration journalière des arbres, b) à lier son évolution à certains éléments microclimatiques et c) à développer un modèle permettant d'estimer la transpiration du verger à partir de la mesure de flux de sève brute.

2. matériel et méthodes

Un verger localisé près de Tunis, dans la plaine de Mornag, à 36° 7' de latitude N et

10° 2' de longitude E, et présentant des rangées orientées de nord-ouest à sud-est, a été choisi comme site expérimental. La parcelle est constituée de pommiers de la variété Golden delicious âgés de 9 ans et plantés à la densité de 4 m × 2 m, soit 1 250 arbres·ha⁻¹. La hauteur moyenne des arbres est de 3,5 m ; la largeur moyenne du feuillage est de 2 m ; la fraction de couverture du sol est donc de 0,5. L'irrigation est assurée par un réseau de goutteurs ayant chacun un débit de 3,8 L·h⁻¹, à raison de quatre goutteurs par arbre.

2.1. mesures microclimatiques

Les mesures de température, vitesse du vent, rayonnement et humidité de l'air ont été effectuées à 50 cm au-dessus des arbres. Le capteur psychrométrique mesurant l'humidité de l'air était constitué d'un thermocouple Cu-Co (cinq soudures + une de référence) ; la vitesse du vent et le rayonnement global ont été évalués à l'aide de capteurs de marque Cimel ; un appareil Campbell 21X a permis d'enregistrer les données issues des mesures effectuées toutes les 10 s et d'établir une moyenne tous les 30 min.

2.2. capteurs de flux de sève

Deux arbres ont été équipés de capteurs de flux de sève basés sur la technique de dissipation de chaleur. Les deux sondes ont été insérées radialement dans le tronc sur une profondeur de 2 cm ; la première sonde se trouvait à 20 cm du sol, la deuxième était insérée 10 cm au-dessus de la première. Un courant stabilisé délivrait une tension continue au niveau de la sonde chauffante ; l'écart de température a été enregistré sur le même matériel et à la même fréquence que ceux adoptés dans le cas des mesures microclimatiques.

2.3. densité de flux de sève

La densité de flux de sève est calculée à partir d'une relation empirique établie pour des espèces forestières [5] et vérifiée pour les pommiers [7] : $K = 0.0206 \cdot U^{(0,8124)}$, où K est l'index de flux [$K = (c(t_0 - dt))/dt$], dt_0 l'écart mesuré à flux de sève nul, dt l'écart

de température enregistré, et U la densité de flux exprimée en $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Une coupe sur tronc d'arbre a permis d'estimer, par différence de teinte, la portion occupée par le xylème conducteur (S_c) par rapport à la section totale du tronc ; cette valeur, évaluée à $S_c = 0,76$, a été utilisée pour calculer le flux de sève $F_s = U \cdot S_c$.

2.4. transpiration du verger

La transpiration de l'ensemble du verger a paru pouvoir être estimée à partir des mesures individualisées de flux de sève, pondérées par les masses foliaires [8]. Cependant, pour un grand nombre d'individus, l'estimation de la masse foliaire est difficile à réaliser. Dans le cas du pommier, le périmètre du tronc, mesuré au-dessus du point de greffe, est un paramètre simple à mesurer et qui est bien corrélé à la masse foliaire (résultats non publiés). En définissant des classes de périmètres statistiquement homogènes et en choisissant un individu par classe, la transpiration Tr est alors calculée comme suit : $Tr = \sum (f_i \cdot D_i)$, où f_i est le facteur de pondération (effectif de la classe / effectif total) et D_i est le flux de sève de l'arbre dont la fréquence est f_i .

Enfin, l'évapotranspiration de référence ET_0 a été calculée selon Allen et al. [9] et la mesure du potentiel hydrique foliaire a été effectuée par une chambre à pression sur cinq feuilles à l'ombre et à 1,5 m du sol.

3. résultats et discussions

3.1. évolution journalière de flux de sève

Les moyennes horaires ont permis d'observer l'évolution simultanée du flux de sève et des différents facteurs climatiques qui l'affectent. Les résultats les plus marquants concernent les effets du rayonnement global au cours de deux journées typiques.

Au cours d'une journée nuageuse, le flux de sève suit de près l'évolution du rayonnement (figure 1). Le flux de sève accuse

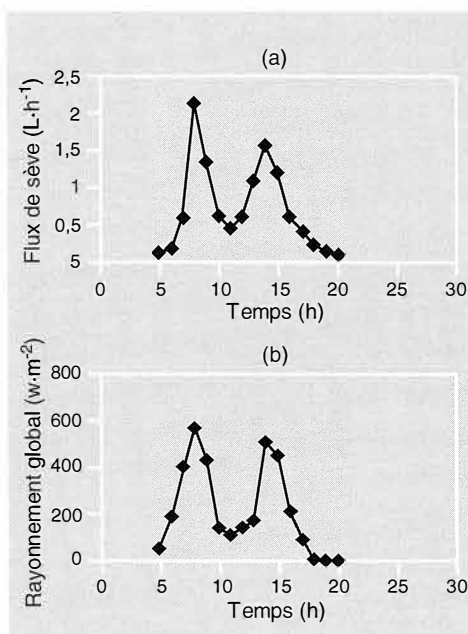


Figure 1. Cinétique horaire du flux de sève (a) et du rayonnement global (b) dans un verger de pommiers en Tunisie au cours d'une journée nuageuse (16 mai 1996).

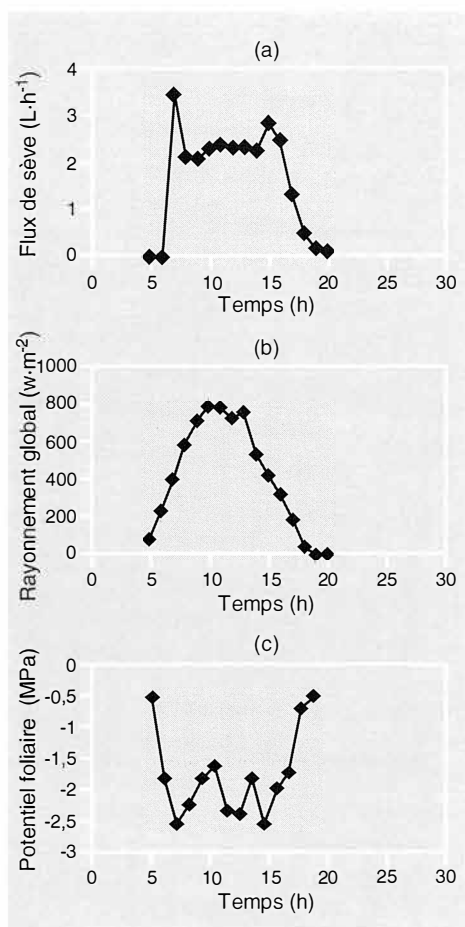
une baisse très sensible (figure 1a) au milieu de la journée, conséquence d'une baisse du rayonnement (figure 1b).

Dans le cas d'une journée ensoleillée (figure 2) où le rayonnement est fort et continu (figure 2b), le flux de sève prend une allure particulière (figure 2a) : il présente deux valeurs maximales, l'une importante le matin, l'autre plus réduite en fin de journée, et une faible évolution cyclique au milieu de la journée. L'évolution de la transpiration est synchronisée à celle du potentiel hydrique foliaire (figure 2c) : baisse très rapide en début de journée, puis légère remontée et stabilisation approximative jusqu'en milieu de l'après-midi. Cette évolution cyclique pourrait être une conséquence d'une fermeture des stomates qui ferait suite à une période d'ouverture forte le matin ; ce comportement a été confirmé par plusieurs observations.

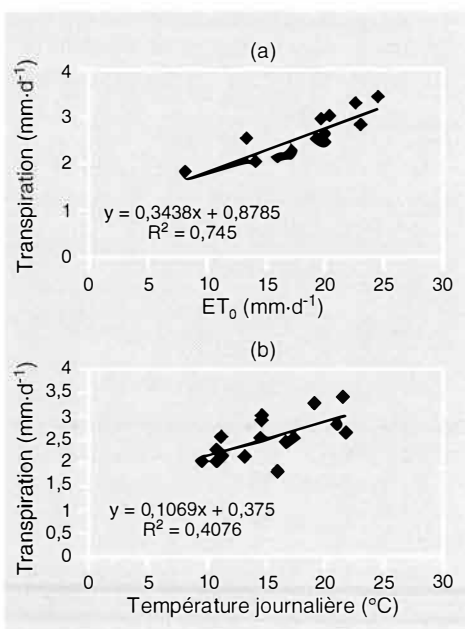
Les deux pics observés pourraient être en partie expliqués par la technique de mesure utilisée. En effet, un test sans chauffage a montré qu'il existait un gradient de température non nul le long du tronc. Ce gradient atteint $+0,6$ °C pendant la nuit, est presque nul en milieu de journée, et négatif avec deux pics en début et fin de journée ($-0,8$ °C).

Figure 2.

Cinétique horaire du flux de sève (a), du rayonnement global (b) et du potentiel hydrique foliaire (c) dans un verger de pommiers en Tunisie au cours d'une journée ensoleillée (24 juillet 1996).

**Figure 3.**

Corrélations entre transpiration du verger et en (a) : ET_0 , évapotranspiration calculée de référence (équation FAO Penman-Monteith), en (b) : la température journalière. Verger de pommiers en Tunisie, 1996.



(1) d = day : unité recommandée pour « jour ».

Par ailleurs, il est apparu un décalage matinal entre flux de sève et rayonnement global qui pourrait être attribué à la participation du réservoir de l'arbre dans la transpiration matinale [10]. Dans ce cas, le flux de sève est plus proche de l'absorption racinaire qui est en retard par rapport à la transpiration. Ce retard est dû d'une part à une forte résistance racinaire par rapport au tissu parenchymateux des feuilles [11] et d'autre part à l'existence d'un gradient de potentiel hydrique entre feuilles et sol, nécessitant un dessèchement des feuilles pour qu'il y ait absorption.

La valeur du potentiel hydrique, de $-2,5$ MPa en milieu de journée, est une valeur forte dans l'absolu qui peut faire poser la question de la disponibilité de l'eau. Les doses d'irrigation appliquées pendant l'expérimentation ont été de l'ordre de $4 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$ (1) pour une $ET_0 = 6 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$. La réduction de la transpiration peut alors être attribuée au transfert de l'eau dans le système sol-zone racinaire.

Par ailleurs, du fait de l'irrigation au goutte-à-goutte qui induit de petites surfaces humectées et une faible énergie disponible par rapport à celle du feuillage et des inter-rangs, l'évaporation du sol est négligeable.

3.2. transpiration du verger et paramètres climatiques

Dans ce qui suit, il a été admis que les deux arbres choisis représentaient le verger, ce qui n'est pas tout à fait vrai. La période considérée, qui va de mi-mai à début juin, est relativement courte ; elle correspond à la fin du stade de nouaison et au début du stade de grossissement des fruits.

Dans les conditions définies, des corrélations ont été établies entre la transpiration et différents paramètres climatiques. La corrélation obtenue en considérant l'ensemble des facteurs climatiques combinés sous la formule de Penman-Monteith (figure 3a) est assez correcte. La valeur non nulle de la transpiration (Tr) pour $ET_0 = 0$ peut être attribuée au fait que ET_0 calculée à partir des mesures climatiques au-dessus des arbres

sous-estime l'évapotranspiration, puisque la formule est supposée s'appliquer à un gazon avec mesure de ces paramètres à 2 m seulement au-dessus du sol. Le rapport moyen $Tr/ET_0 = 0,54$ correspond en effet aux besoins nets des arbres (K_{cb} : coefficient cultural de base) et coïncide avec le taux de couverture du sol par le feuillage.

D'autres corrélations reliant la transpiration à des éléments climatiques simples tels que le rayonnement global, le déficit de saturation ou la température ont été établies. Celle qui correspond à la température moyenne journalière (*figure 3b*) est la plus intéressante même si le coefficient de détermination reste faible.

Par ailleurs, le rapport (transpiration / rayonnement net) a varié autour d'une valeur de 0,36. Cela indique qu'en moyenne 40 % de l'énergie a été dissipée par chaleur latente et 60 % par chaleur sensible.

4. conclusion

Les résultats obtenus dans le cadre de cette expérimentation montrent l'intérêt de la mesure du flux de sève qui permet à la fois de comprendre les mécanismes des transferts hydriques à travers l'arbre et de quantifier la transpiration.

La suite de ces travaux orientés vers l'évaluation de la transpiration devrait conduire à :

- effectuer des mesures sur un plus grand nombre d'arbres en se basant sur une étude statistique complète du diamètre du tronc, tout en vérifiant la relation diamètre-surface des feuilles pour le type de taille pratiqué,
- compléter les mesures de flux de sève par des mesures physiologiques portant sur la conductance stomatique afin de vérifier la cinétique des flux de sève,
- estimer l'erreur sur la transpiration moyenne.

remerciements

Nous tenons à remercier le président-directeur-général de la société Sadira de

Mornag et l'ensemble du personnel pour avoir facilité la réalisation des travaux présentés.

références

- [1] Cohen Y., Fuchs M., Green G.C., Improvement of the heat pulse method for determining sap flow in trees, *Plant Cell Environ.* 4 (1981) 391-397.
- [2] Sakuratani T., A heat balance method for measuring water flux in the stem of intact plants, *J. Agr. Met.* 37 (1) (1981) 9-17.
- [3] Valancogne C., Nasr Z., Une méthode de mesure de débit de sève brute dans de petits arbres par bilan de chaleur, *Agronomie* 9 (1989) 609-617.
- [4] Peressotti A., Ham Jay. M., A dual-heater gauge for measuring sap flow with an improved heat-balance method, *Agron. J.* 88 (1996) 149-155.
- [5] Granier A., Une nouvelle méthode pour la mesure du flux de sève brute dans les troncs des arbres, *Ann. Sci. Forest.* 42 (2) (1985) 193-200.
- [6] Granier A., Mesure du flux de sève brute dans le tronc du Douglas par une nouvelle méthode thermique, *Ann. Sci. Forest.* 44 (1) (1987) 1-14.
- [7] Cabibel B., Do F., Mesures thermiques des flux de sève dans les troncs et les racines et fonctionnement hydrique des arbres, I. Analyse théorique des erreurs sur la mesure des flux et validation des mesures en présence de gradients thermiques extérieurs, *Agronomie* 11 (1991) 669-678.
- [8] Nasr Z., Mesure de débit de sève au niveau des troncs d'arbres, Application dans la recherche des modèles climatiques de consommation en eau des vergers, *Alawamia* 88 (1995) 35-41.
- [9] Allen R.G., Smith M., Perrier A., Pereira L.S., An update for the definition of reference evapotranspiration, *ICID Bulletin* Vol. 43 No. 2 (1994) 35-92.
- [10] Nasr Z., Mesure de débit de sève brute dans un arbre par une méthode thermique, Évaluation de la méthode et applications, université d'Orsay, Paris-VI, France, thèse, 1989, 84 p.
- [11] Kramer J.P., Transpiration, in: Kramer P.J., *Water relations in plants*, Academic Press Inc., London, UK, 1983, 291-341.

Estimación de la transpiración de manzanos en clima semi-arido, mediante la medición del flujo de savia bruta.

Resumen — Introducción. Para evitar el estrés hídrico prolongado de árboles fruteros en zonas semi-áridas, se merecía poder cuantificar su transpiración y estudiar su evolución acorde a ciertos factores del medio físico. Una experimentación, llevada a cabo en la región de Túnez, intentó evaluar la transpiración diaria de los árboles, relacionar su evolución con ciertos elementos micro climáticos y desarrollar un modelo permitiendo estimar la transpiración del vergel a partir de la medición del flujo de savia bruta. **Material y métodos.** Un vergel de manzanos (cv. Golden delicious) con 9 años de edad, con 1.250 árboles-ha⁻¹, e irrigado con cuenta-gota permitió efectuar regularmente mediciones microclimáticas y de potencial foliar. El flujo de savia bruta de dos árboles fue medido mediante captadores térmicos con disipación de calor durante la fase de cuajado de las frutas. La transpiración del vergel fue calculada al ponderar el flujo de savia por la masa foliar de los árboles estudiados. **Resultados y discusiones.** La cinética diaria de la transpiración resultó ser relacionada con la radiación global. Cuando ésta es superior a 500 W, la transpiración y el potencial presentan variaciones cíclicas que reflejan el comportamiento de los estomas en condiciones de fuerte demanda de evaporación. La transpiración del vergel se halla en buena correlación con la evapotranspiración calculada con la ecuación Penman-Monteith ($r^2 = 0,75$); lo es menos con la temperatura media diaria ($r^2 = 0,41$). **Conclusión.** Los resultados preliminares logrados muestran el interés de la medición del flujo de la savia para comprender los mecanismos de las transferencias hídricas a través del árbol y cuantificar la transpiración. Tendrán que completarse a partir de experimentaciones más indagadas. (© Elsevier, Paris)

Túnez / *Malus* / clima semi-arido / transpiración / flujo de savia / modelos matemáticos