

## Comparaison de 3 méthodes de mesure de la transpiration de jeunes arbres

T Améglio<sup>1</sup>, FA Daudet<sup>1</sup>, P Archer<sup>1</sup>, I Ferreira<sup>2</sup>

avec la collaboration technique de R Pallut, R Falcimagne, M Crocombette

<sup>1</sup> INRA-Université Blaise-Pascal, unité associée de physiologie intégrée de l'arbre fruitier (PIAF),  
domaine de Crouelle, F63039 Clermont-Ferrand cedex, France;

<sup>2</sup> Instituto Superior de Agronomia, Departamento de engenharia rural, Tapada da Ajuda, 1399 Lisboa Codex, Portugal

(Reçu le 13 mars 1992; accepté le 16 juin 1993)

**Résumé** — Trois méthodes de mesure de la transpiration ont été comparées sur de jeunes noyers (*Juglans regia* L, cv Lara) cultivés en bacs, pendant une période de 115 j en 1990. La mesure de transpiration par pesée a servi de référence et a été comparée à la mesure du flux de sève dans le tronc par bilan thermique, ainsi qu'à la mesure de transpiration par échanges gazeux. De plus les mesures de flux de sève ont été multipliées sur le même arbre afin, d'une part, d'estimer la sensibilité de cette méthode et, d'autre part, d'évaluer le stockage d'eau entre ces 2 hauteurs. Un calage précis de la mesure du flux de sève a été obtenu dans le cas où les arbres ont subi une courte période de sécheresse intense, ce qui a conduit alors à un très bon accord avec la pesée, qu'il s'agisse des valeurs horaires ou journalières sur une période relativement longue (115 jours). La mesure de la transpiration par échanges gazeux est systématiquement sous-estimée. Il semble que cette sous-estimation puisse être corrigée par un étalonnage précis de tous les capteurs en cause et par la mise en œuvre d'une correction de la pression dans le calcul des teneurs en vapeur d'eau de l'air. Enfin, les stockages ou déstockages d'eau dans l'arbre n'ont pu être quantifiés correctement malgré la très bonne sensibilité de la méthode de flux de sève (précision : 3 %).

**flux de sève / échanges gazeux / pesée / bilan de chaleur**

**Summary** — **Comparison of 3 methods for measuring the transpiration rate of young trees.** Three different methods of measuring the transpiration in young potted walnut trees (*Juglans regia* L, cv Lara) were compared over a 115-d period in 1990. Weighing of the pots was used as the reference for comparison with the sap flow rate given by a thermal method and the rate of transpiration by gas exchange determination. Several sap flow meters were installed at different heights on the same tree in order to estimate the storage of water between them. A good calibration of the sap flow measurement method was obtained in those trees which had been subjected to a short period of severe water stress, leading to an excellent agreement with hourly or daily values of transpiration by weighing. Gas exchange determination systematically underestimated transpiration. Nevertheless it seems possible to improve gas exchange determination of transpiration by: i) accurate calibration of all the sensors; and ii) introducing a pressure correction in the calculation of water vapour density in the air. Although the accuracy of the sap flow method was high (3%), it was not possible to assess within tree water movement correctly.

**sap flow / gas exchange / weighing / heat budget**

## INTRODUCTION

Une bonne image de l'état physiologique instantané d'un couvert végétal est donnée par l'intensité de ses échanges gazeux — photosynthèse et transpiration —, en référence au contexte climatique. Les contraintes environnementales ou physiologiques se manifestent en effet très rapidement par une altération de ces échanges. L'intégration dans le temps des flux gazeux conduit par ailleurs au calcul de 2 bilans : bilan de carbone et bilan hydrique dont la connaissance est à la base de la modélisation du fonctionnement des cultures.

Ainsi a-t-on recherché depuis longtemps des méthodes permettant de mesurer la transpiration et/ou la photosynthèse de différents types de couverts végétaux à différentes échelles d'espace et de temps. Parmi celles-ci, les méthodes micrométéorologiques présentent l'avantage de ne perturber ces échanges que d'une façon insignifiante. Des techniques comme le bilan d'énergie (Perrier *et al*, 1975 ; McGinn et King, 1990) et la méthode aérodynamique simplifiée (Itier *et al*, 1985) permettent de suivre en continu l'évapotranspiration des couverts végétaux mais les hypothèses assez restrictives qu'elles comportent en ce qui concerne le caractère unidimensionnel des échanges turbulents ne permettent pas de les appliquer à des couverts discontinus ou hétérogènes (de type verger par exemple).

La mesure de la transpiration sur les espèces ligneuses a par ailleurs donné lieu à la mise au point de plusieurs méthodes thermiques de mesure des flux de sève. Celle développée par Sakuratani (1981), reprise par Valancogne et Nasr (1989) puis améliorée par Valancogne et Nasr (1993), consiste à évaluer les différents termes du bilan thermique d'un élément de tronc ou de tige, chauffé par effet Joule : le terme convectif de dissipation de la chaleur est alors directement proportionnel au flux massique de la sève. Fondée sur un principe physique simple, cette méthode présente théoriquement l'avantage d'éliminer pratiquement les erreurs d'étalonnage, par un calage de certaines constantes *in situ*.

Des systèmes d'enceintes fonctionnant en circuit ouvert (Balding *et al*, 1973 ; Greenwood et Beresford 1979, 1980 ; Daudet, 1987) ont également été proposés pour étudier les échanges gazeux de petites surfaces de couverts végétaux *in situ*. Ils présentent l'inconvénient d'introduire une perturbation plus ou moins importante de l'environnement physique des plantes mais ils

constituent aujourd'hui la seule méthode aisément utilisable sur arbres isolés.

Nous présentons ici une comparaison des résultats obtenus à l'aide des diverses méthodes de mesure de la transpiration utilisables sur de jeunes arbres fruitiers ou forestiers. Parmi celles-ci, la pesée des bacs de culture nous servira de référence à l'échelle journalière pour les comparer. Mais l'intérêt d'une telle comparaison, qui à notre connaissance n'a jamais été réalisée auparavant, ne présente pas seulement un attrait technique. La combinaison des mesures de transpiration et de flux doit théoriquement nous renseigner sur le stockage ou le destockage d'eau dans la partie aérienne de l'arbre, phénomène dont l'intérêt physiologique est évident.

## MATÉRIEL ET MÉTHODES

### *Matériel végétal*

Les arbres étudiés proviennent de scions greffés de noyers (*Juglans regia* L, cv Lara), plantés (printemps 1988 : hauteur = 1,5 m, diamètre = 0,05 m) en conteneurs de 200 litres sur un substrat comprenant 1/3 de tourbe et 2/3 de terre de Limagne. Ils sont cultivés en conditions naturelles avec une irrigation par excès apportée chaque j à heure fixe. Au cours de la première année de reprise, les arbres présentaient une structure homogène comprenant un tronc et 2 ou 3 rameaux secondaires. Lors de la seconde année de reprise qui fait l'objet des travaux présentés ici, les feuilles étaient portées par les rameaux d'ordre 3.

### *Dispositif expérimental*

Deux arbres ont été étudiés, référencés N49 et N51. Ces 2 arbres ont été équipés de capteurs de flux de sève et soumis à une mesure prolongée de leurs échanges gazeux. L'arbre N49 était par ailleurs pesé de façon à déterminer sa transpiration.

### *Mesure de la transpiration par pesée*

L'arbre N49 et son conteneur ont été posés sur le plateau d'une balance électronique (portée = 300 kg, sensibilité = 100 g, erreur totale sur la mesure = 180 g dûs à la précision de la balance et à la précision des mesures de drainage et de la quantité d'eau d'arrosage). Le poids en a été déterminé chaque j à 6 h (TSV). L'arbre était enfermé dans une enceinte transparente en PVC rigide, destinée par ailleurs à permettre la détermination de sa transpiration par mesure

des échanges gazeux. Afin d'éliminer l'effet du vent sur la pesée, l'enceinte a été suspendue à un portique de façon à ne pas peser sur le compartiment racinaire et l'étanchéité au niveau de ce dernier a été assurée par un joint hydraulique (fig 1).

### Mesure de la transpiration par échanges gazeux

La méthode utilisée reprend le principe des chambres d'assimilation et de transpiration fonctionnant en circuit ouvert. L'appareillage a été décrit par Daudet (1987). Nous ne rappellerons dans ce qui suit que quelques traits utiles à la compréhension des résultats et à la discussion.

### Les enceintes

Deux enceintes ont été utilisées simultanément ; elles ont été réalisées avec 2 polymères transparents différents :

- i) le polyéthylène en film souple d'épaisseur 0,03 mm : ce matériau a été retenu pour sa bonne transparence au rayonnement infrarouge thermique (minimisant les effets de serre radiatifs), sa grande légèreté qui permet de n'utiliser qu'un support rudimentaire, et sa facilité de mise en forme par soudure. Il présente cependant l'inconvénient de vieillir par action des UV, ce qui limite sa transparence et sa résistance mécanique à long terme. La transmittance du film neuf dans la gamme du rayonnement PAR est de 90 %;
- ii) le PVC en épaisseur 2 mm : nous avons employé ce polymère pour réaliser une enceinte cylindrique

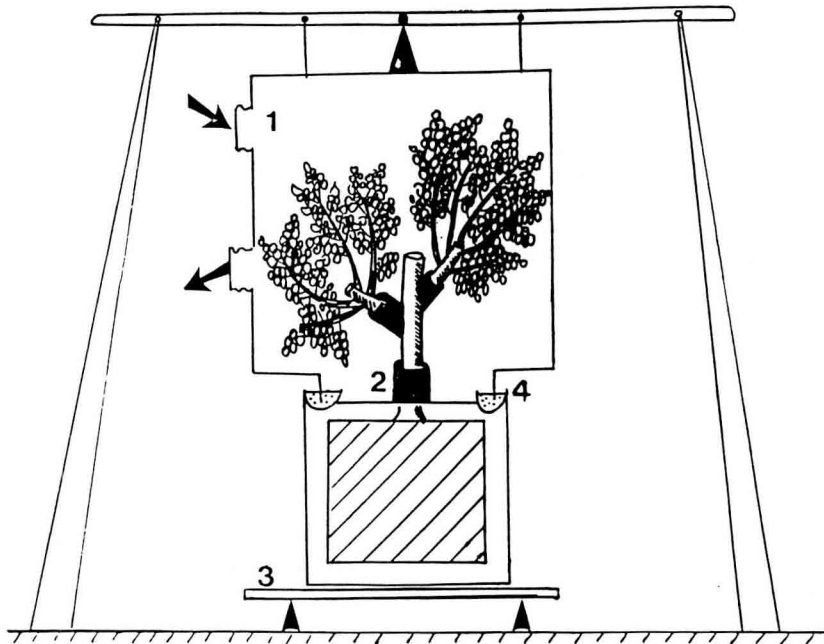
(hauteur = 2 m, diamètre = 1,44 m, volume = 3,25 m<sup>3</sup>), armée, étanche et indéformable, utilisée pour l'étude continue des échanges gazeux de l'arbre placé sur la balance. La transmittance de cette enceinte dans le PAR est de 85% (on suppose qu'elle est nulle dans l'infra-rouge thermique).

### Ventilation

Une soufflerie placée à une hauteur d'environ 2,5 m au dessus du sol prélève l'air ambiant et impose une circulation intense dans l'enceinte afin de minimiser les écarts entre les caractéristiques de l'air à l'intérieur et à l'extérieur. Malgré des taux de renouvellement importants — de l'ordre de 4 à 5 par minute — la vitesse du vent autour des feuilles est en moyenne très faible (plus faible en tout cas que dans les conditions naturelles). Par ailleurs on peut constater que de légères différences de température et d'hygrométrie se manifestent, notamment aux heures les plus chaudes de la journée. Il est probable que cette altération du microclimat autour de l'arbre par rapport aux conditions naturelles est à l'origine d'une perturbation des échanges gazeux. Il ne nous a pas été possible d'évaluer cette perturbation. Celle-ci est sans incidence pour notre propos actuel puisque toutes les mesures que nous présentons ici ont été effectuées sur les mêmes arbres, installés dans l'enceinte en PVC ou dans celle en polyéthylène.

### Calcul de la transpiration

Le calcul de la transpiration suppose que l'on connaisse simultanément le débit général d'air qui traverse l'enceinte et l'écart de concentration en vapeur d'eau entre l'entrée et la sortie.



**Fig 1.** Représentation schématique des différents systèmes de mesures installés sur l'arbre N49. 1: échanges gazeux, 2: flux de sève, 3: pesée, 4: joint hydraulique.

### Calcul des écarts de concentration en vapeur d'eau

La température de l'air à l'entrée de l'enceinte,  $T_{a_e}$ , est mesurée de façon continue à l'aide d'un thermocouple. La température de rosée est mesurée à l'aide d'un hygromètre à point de rosée fixé sur l'enceinte. Les mesures sont effectuées par périodes élémentaires de 200 secondes sur des échantillons d'air prélevés alternativement à l'entrée ( $Tr_e$ ) et à la sortie ( $Tr_s$ ) de l'enceinte. Ces deux mesures permettent de calculer en permanence les concentrations de vapeur d'eau correspondantes  $W_e$  et  $W_s$ .

### Calcul du débit d'air Q

La mesure du débit Q s'effectue automatiquement sur chaque enceinte à raison d'une fois toutes les 50 min environ, en injectant, sous contrôle d'un régulateur de débit massique, un débit connu de  $CO_2$  et en mesurant l'enrichissement ainsi provoqué (méthode de dilution).

### Étalonnage

La mesure de Q constitue en quelque sorte l'étalonnage du système. La précision des mesures de photosynthèse dépend uniquement de la précision du régulateur de débit massique. Pour la transpiration interviennent en outre la qualité de l'étalonnage de l'analyseur de  $CO_2$  différentiel et la précision de l'hygromètre à point de rosée.

### Mesure de la transpiration par flux de sève

La méthode est décrite en détail par Valancogne et Nasr (1993). Sur chaque arbre, 3 à 4 capteurs ont été installés : un sur le tronc à environ 20 cm au dessus du sol, et 1 par rameau secondaire, ce qui a permis de vérifier que le débit de sève mesuré sur les troncs était bien égal à la somme des débits mesurés sur les rameaux secondaires, et qui constitue un élément de validation de la technique.

### Étalonnage

Il est en principe inutile d'étalonner la méthode. Il faut néanmoins déterminer le coefficient d'étalonnage du fluxmètre latéral. Pour ce faire il faut disposer d'une période de flux de sève nul. L'expérience a montré qu'une telle période ne s'observe aisément dans les conditions où nous avons travaillé, que si l'arbre est soumis à un stress hydrique sévère.

## RÉSULTATS

Les résultats présentés portent sur une période de 115 jours de l'année 1990 — du 24 juin (J175) au 17 octobre (J290) —, au cours de la-

quelle des comparaisons méthodologiques ont pu être effectuées.

### Comparaison des valeurs instantanées

La précision de la balance étant insuffisante, il n'a pas été possible d'utiliser la pesée comme méthode de référence à l'échelle horaire. Pour de courts laps de temps (de l'ordre de 15 min), nous ne pouvons donc faire la comparaison qu'entre les différentes mesures de flux de sève, ce qui nous indiquera la sensibilité de cette méthode, ou entre échanges gazeux et flux de sève.

### Flux de sève à différentes hauteurs

Nous présenterons ici cette comparaison sur une journée (le 15 juillet 1992 : J196) pour l'arbre N51 (fig 2). Au cours de cette journée, le cumul des flux des 2 rameaux est à chaque instant très voisin du flux passant au niveau du tronc. On note par ailleurs un léger déphasage entre le cumul des rameaux et le flux à la base du tronc. Ce dernier est légèrement inférieur au cumul des flux des rameaux en début de journée, puis devient supérieur à ce cumul en fin de journée. La représentation des couples de points individuels (cumul des rameaux en fonction du débit de sève à la base du tronc) (fig 3) souligne la sensibilité de la méthode et fait apparaître une boucle

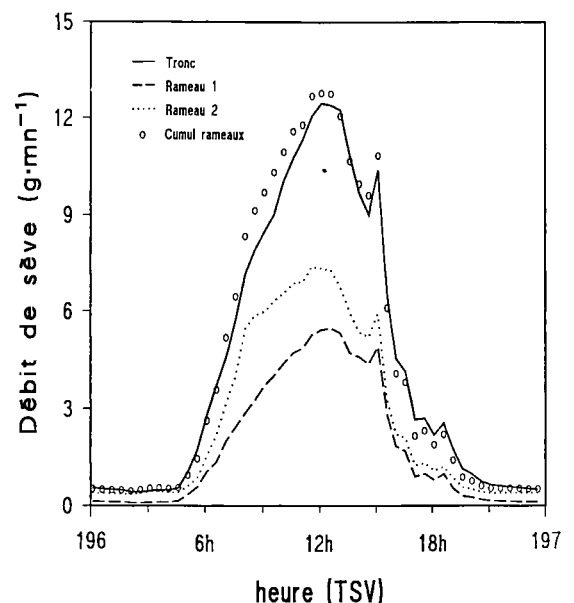


Fig 2. Comparaison du flux de sève à la base du tronc par rapport au flux de sève des 2 rameaux secondaires de l'arbre N51 (J196 = 15 juillet 1990).

parcourue ici dans le sens indirect et qui traduit une intervention du «réservoir» d'eau du tronc. Sur l'ensemble de la journée, le calcul d'un bilan hydrique du tronc donne un flux de sève à la base du tronc de 6 356 g pour un flux cumulé à la base des rameaux de 6 544 g, soit une perte de 188 g (fig 4).

### Flux de sève et transpiration

Au cours d'une journée très ensoleillée (le 25 juillet 1990 (J206) pour l'arbre N51), les mesures de transpiration et de flux de sève suivent une évolution très régulière (fig 5) mais le flux de sève est toujours supérieur à la transpiration, notamment la nuit. La transpiration nocturne est en effet quasiment nulle alors qu'il semble exister en permanence un flux de sève positif (valeur résiduelle de l'ordre de  $0,6 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$  qui pourrait être dû, au moins partiellement, à la croissance). On note par ailleurs que le maximum de flux de sève apparaît après celui de transpiration.

La représentation des couples de points individuels (flux de sève en fonction de transpiration, fig 6) souligne l'étroite liaison des 2 grandeurs et fait apparaître ce même résultat sous forme d'une ordonnée à l'origine non nulle. Elle met en outre en évidence une boucle qui est ici parcourue dans le sens direct et qui traduit un retard du flux de sève sur la transpiration, retard qui pourrait s'expliquer par l'intervention des réservoirs d'eau de la plante. Le calcul du bilan hydrique de l'arbre pour cette journée (fig 7) donne un flux de

sève à la base du tronc de 9 320 g et une transpiration de 7 528 g, soit un gain de 1 792 g.

### Conclusion

La comparaison des mesures de flux de sève à 2 hauteurs renseigne sur la sensibilité de la méthode. La précision des mesures est relativement bonne (de l'ordre de 3 %). Par contre, nous avons obtenu sur la majorité des journées un cumul des flux des rameaux plus important que le flux à la base du tronc, ce qui voudrait

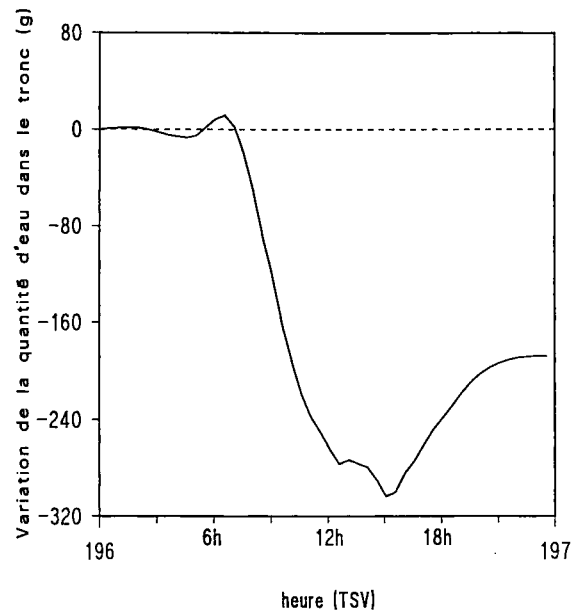


Fig 4. Variation apparente de la quantité d'eau contenue dans le tronc, obtenue par la différence cumulée entre les flux de sève à 2 hauteurs (J196 = 15 juillet 1990).

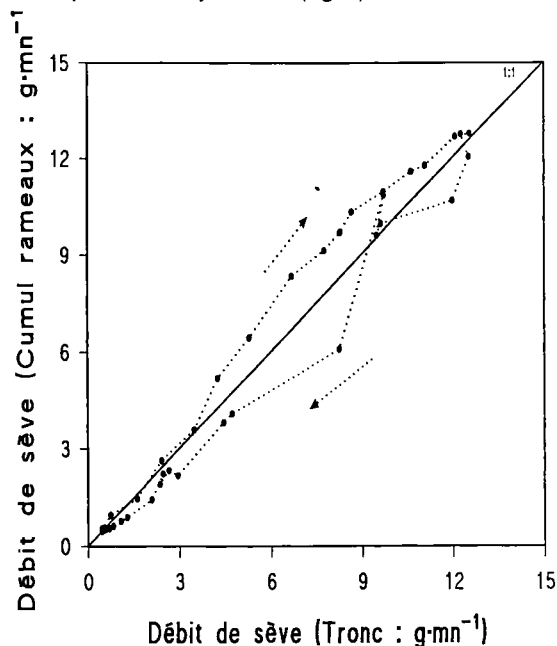


Fig 3. Relation entre les valeurs instantanées du flux de sève à la base du tronc et du cumul des flux des 2 rameaux secondaires au cours d'une journée (J196 = 15 juillet 1990).

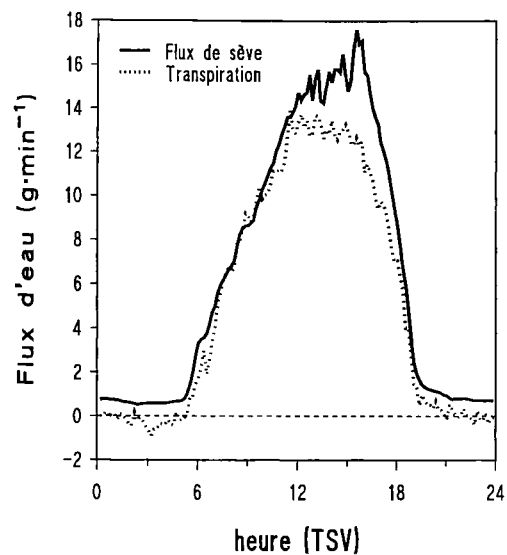
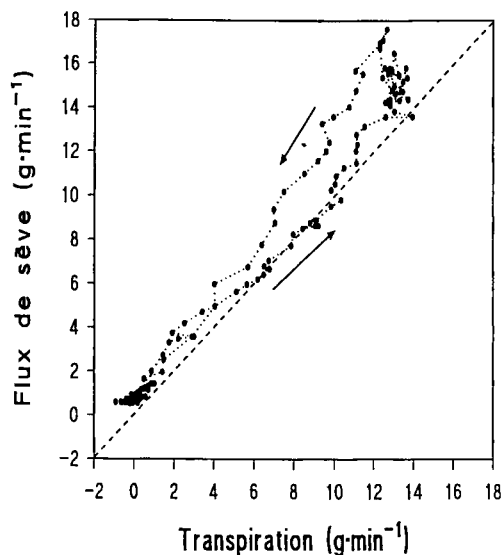
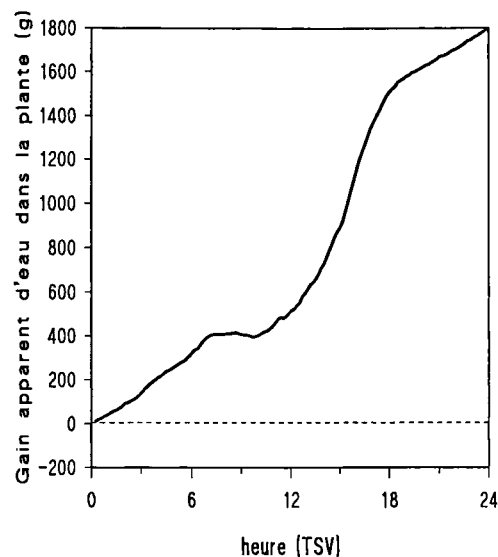


Fig 5. Variation horaire du flux de sève (bilan de chaleur) et de la transpiration (échanges gazeux) au cours d'une belle journée (J206 = 25 juillet 1990).



**Fig 6.** Relation entre les valeurs instantanées du flux de sève (bilan de chaleur) et de la transpiration (échanges gazeux) au cours d'une belle journée (J206 = 25 juillet 1990).



**Fig 7.** Gain apparent d'eau par la partie aérienne (différence cumulée entre flux de sève et transpiration), au cours de la même journée que pour les figures 5 et 6.

dire que l'organe tronc se déshydrate, ce qui est contradictoire avec des observations de croissance radiale faites par ailleurs. De plus, l'obtention d'une boucle de sens direct, traduisant la mise en jeu des réserves en eau du tronc, est loin d'être systématique et c'est plutôt l'absence de cette dernière qui prédomine.

Les valeurs instantanées de flux de sève et de transpiration sont en étroite corrélation, le flux de sève pouvant être, d'un point de vue dynamique, légèrement déphasé et amorti par rapport à la transpiration. Selon les journées et les arbres considérés, ce déphasage est plus ou moins prononcé. Les régressions calculées entre flux de sève et transpiration instantanées présentent une ordonnée à l'origine non nulle et une pente différente de 1. En particulier, le flux de sève calculé n'est jamais nul la nuit alors que la transpiration est nulle voire négative (condensations). Cela conduirait en termes de bilan à une accumulation continue d'eau dans les parties aériennes d'environ 1 000 à 2 000 g par arbre et par j. Cette apparente accumulation, très supérieure au flux d'eau admissible pour la croissance (au plus 50 g par j selon notre estimation), se répétant sensiblement à l'identique de j en j, il faut admettre qu'un biais systématique existe sur la détermination des flux par l'une ou l'autre des 2 méthodes considérées. Nous nous attachons dans ce qui suit à en déterminer l'ampleur et l'origine.

### Comparaison des valeurs journalières

Seules les journées complètes pour lesquelles aucun incident ne s'est manifesté ont été conservées pour ces comparaisons.

### Flux de sève et transpiration par échanges gazeux

#### Arbre N51, enceinte en polyéthylène (26 observations)

Les valeurs cumulées journalières fournies par les 2 méthodes sont en bonne corrélation mais la droite de régression dont l'équation s'écrit :

$$\text{FluxSève} = 1,004 * \text{Transpiration} + 839$$

$$(R^2 = 0,64)$$

s'écarte de façon significative de la première bissectrice. Il y a donc bien un écart systématique entre les valeurs fournies par les deux méthodes, écart qui s'explique par l'ordonnée à l'origine non nulle.

#### Arbre N49, enceinte en PVC (41 observations)

Les conclusions sont sensiblement identiques à ce que nous venons de voir pour l'arbre N51, avec une droite de régression légèrement différente (fig 8) :

$$\text{FluxSève} = 1,017 * \text{Transpiration} + 815$$

$$(R^2 = 0,88)$$

### Conclusion

On retrouve à l'échelle journalière l'écart systématique entre les 2 méthodes déjà signalé à l'échelle horaire, le calcul de transpiration par échanges gazeux fournissant une valeur toujours inférieure au flux de sève. Cet écart représente de 700 à 2000 g d'eau par jour, ce qui exclut de l'expliquer par l'intervention des réservoirs d'eau de la plante ou par la croissance. L'examen des valeurs horaires montre que la transpiration nocturne est souvent nulle alors que le flux de sève ne s'annule que rarement la nuit. Une part importante des écarts entre les 2 méthodes provient de ces différences entre valeurs nocturnes.

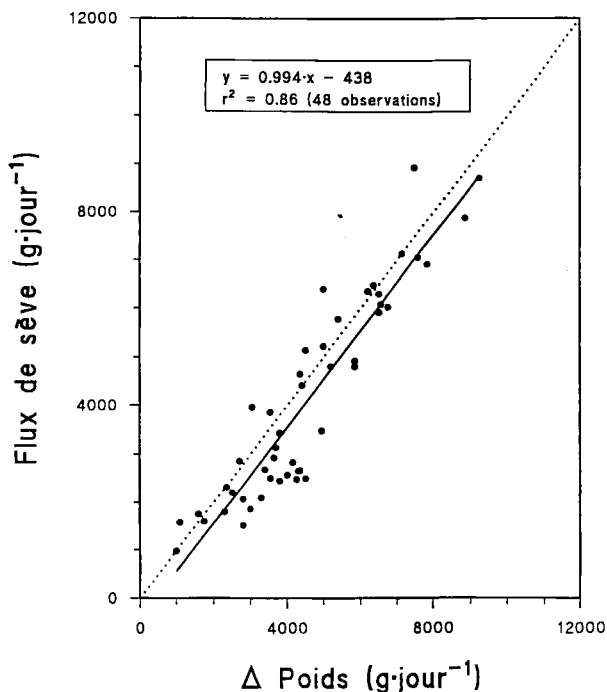
### Pesée et flux de sève

Ces comparaisons ont pu être effectuées sur l'arbre 49, et elles portent sur 48 observations. La droite de régression :

$$\text{FluxSève} = 0,9943 * \text{DeltaPoids} - 438$$

$$(R^2 = 0,86)$$

n'est pas significativement différente de la première bissectrice (fig 9). Les deux méthodes sont donc en excellente concordance.



**Fig 8.** Relation entre valeurs journalières de transpiration (échanges gazeux) et de flux de sève (bilan de chaleur).

### Pesée et échanges gazeux

Cette comparaison (fig 10) porte sur 54 couples d'observations. La droite de régression s'écrit :

$$\text{Transpiration} = 1,058 * \text{DeltaPoids} - 1461 \text{ g}$$

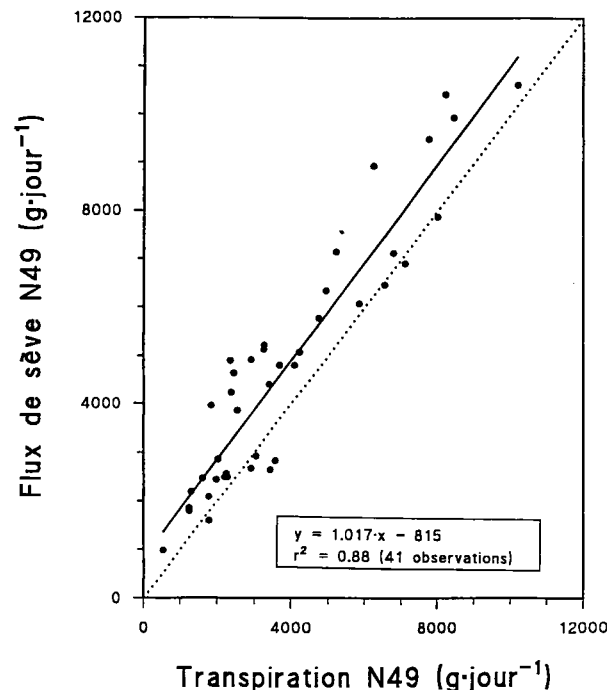
$$(R^2 = 0,89)$$

La pente de la droite ainsi trouvée n'est pas significativement différente de l'unité, par contre l'ordonnée à l'origine est significativement non nulle. Une explication pourrait être fournie par l'évaporation du sol qui n'est pas comptabilisée par la mesure d'échanges gazeux, mais le fait que la mesure de flux de sève soit en excellent accord avec la pesée invalide cette hypothèse (l'évaporation du sol est sans doute négligeable).

### DISCUSSIONS

On peut tirer des résultats présentés ci-dessus quelques conclusions :

La mesure de transpiration par échanges gazeux semble systématiquement sous-estimée. Cet écart semble essentiellement provenir d'une ordonnée à l'origine non nulle (en fait négative) comme on peut le constater dans la comparaison Transpiration - DeltaPoids (fig 10), alors que la pente n'est jamais très éloignée de l'unité.



**Fig 9.** Relation entre valeurs journalières de flux de sève (bilan de chaleur) et transpiration déterminée par pesée.

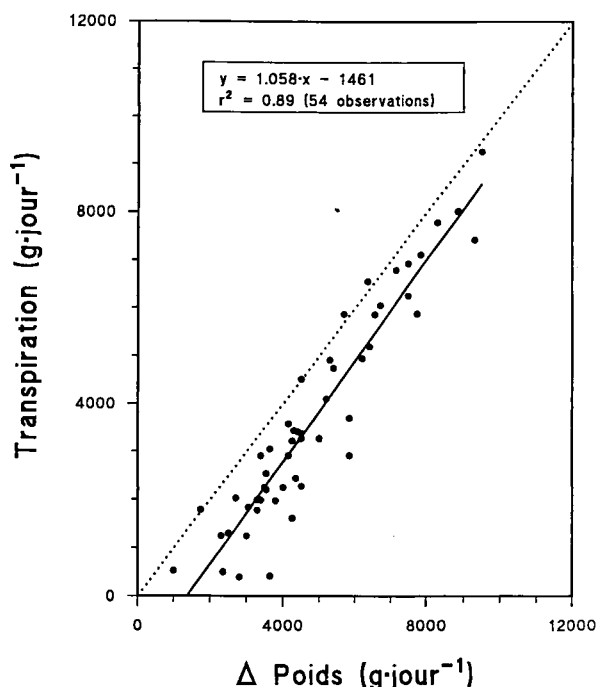


Fig 10. Relation entre valeurs journalières de transpiration déterminée par mesure des échanges gazeux et par pesée.

Quelques hypothèses sont envisageables :

- les condensations nocturnes : elles se déposent fréquemment sur les parois internes de l'enceinte (d'où l'existence de valeurs nocturnes négatives de la transpiration). Ce phénomène ne permet cependant pas de comprendre un écart systématique avec la pesée car cette eau condensée s'évapore dans les premières heures de la journée suivante ;

- le mode de mesure des températures de rosée à l'entrée et à la sortie des enceintes : l'utilisation d'un seul capteur en alternance (par périodes de 200 secondes avec 70 secondes de temporisation pour mise en équilibre) sur l'air échantillonné tantôt à l'entrée, tantôt à la sortie de l'enceinte peut entraîner une sous-estimation de l'écart de température de rosée entrée-sortie, si l'équilibre du capteur n'est pas parfaitement réalisé assez rapidement. Ce phénomène pourrait expliquer une partie du décalage systématique entre valeurs instantanées de flux de sève et de transpiration.

Des mesures d'évaporation par pesée et par échanges gazeux sur bac d'eau chauffé électriquement ont été faites ultérieurement et nous ont permis de progresser dans cette analyse des écarts entre les 2 méthodes : en conditions très stables d'évaporation, une sous-estimation d'environ 10 à 15% subsiste systématiquement sur

l'évaporation calculée par échanges gazeux. Une analyse critique du calcul de transpiration par échanges gazeux et la vérification de l'étalonnage des capteurs a révélé 2 causes probables à l'origine de cette sous-estimation :

- Un mauvais étalonnage du débitmètre utilisé pour mesurer le débit d'injection de  $\text{CO}_2$ . Une sous-estimation d'environ 6% a été constatée, erreur qui se répercute intégralement sur le calcul du débit général d'air qui circule dans l'enceinte.

- Une valeur de la pression ambiante au niveau du capteur de point de rosée très sensiblement inférieure à la pression atmosphérique normale. D'une part, en effet, à l'altitude de Clermont-Ferrand (330 m), la pression atmosphérique est d'environ 980 hectoPascals (au lieu de 1013 au niveau de la mer), d'autre part, la cellule de mesure du point de rosée est soumise à une dépression de 10 à 25 hPa par rapport à la pression atmosphérique ambiante (du fait de l'aspiration de l'échantillon d'air). Ce décalage par rapport à la pression normale conduit à sous-estimer d'environ 6% les concentrations de vapeur d'eau dans l'air ( $W_e$  et  $W_s$ ). Une correction de pression est donc nécessaire pour une mesure précise des flux de vapeur d'eau.

Ces 2 erreurs s'ajoutant et se répercutant sur le calcul de l'évaporation, elles expliquent intégralement les écarts trouvés en conditions contrôlées. On peut penser qu'un étalonnage précis du débitmètre et l'introduction d'une correction de pression permettraient dans l'avenir une mesure plus précise et rigoureuse de la transpiration des arbres par échanges gazeux. À cet effet un capteur de pression absolue sera intégré prochainement aux hygromètres.

## CONCLUSION

Nous avons examiné 2 méthodes de mesure de la transpiration utilisables sur de jeunes arbres, la pesée nous servant de référence. Il ressort des comparaisons effectuées que la méthode thermique de mesure du flux de sève est en excellent accord avec la mesure par pesée et qu'elle permet d'accéder à une image détaillée des dynamiques horaires. Il faut toutefois signaler que cette méthode nécessite un étalonnage (ou plutôt un calage) qui ne s'opère correctement que si l'on peut disposer de périodes, même courtes, pour lesquelles le flux de sève s'annule complètement. L'expérience a montré que de



telles périodes ne s'observent que très rarement en conditions naturelles ; dans le cas de l'arbre N49 soumis à une période de contrainte hydrique intense, nous avons atteint des flux de sève véritablement nuls. Les résultats présentés montrent que, dans ces conditions optimales de calage, le calcul du flux de sève conduit à des valeurs précises y compris sur de longues périodes, ce qui indique par ailleurs que les éventuels phénomènes de vieillissement, que l'on pouvait craindre par suite de la cicatrisation des tissus lésés au niveau de l'implantation des sondes de température, n'interviennent pas de façon notable sur la qualité de la mesure.

La mesure de transpiration par échanges gazeux est sensible et permet une étude assez fine des phénomènes dynamiques (à la même échelle de temps que la mesure des flux de sève). La réalisation, qui en a été étudiée ici, conduit à une sous-estimation systématique des flux instantanés. Nous venons de voir que cette sous-estimation doit pouvoir être corrigée de manière très significative par un étalonnage soigneux des capteurs employés et la prise en compte d'une correction de pression.

En ce qui concerne le fonctionnement hydrique de l'arbre qui constituait le second but de cette étude, l'utilisation simultanée des 2 méthodes devait nous permettre d'accéder à une évaluation en continu des phénomènes de stockage et de déstockage de l'eau dans la partie aérienne ; de même la comparaison des flux de sève à 2 hauteurs pouvait permettre d'établir le bilan hydrique de l'arbre entre ces 2 hauteurs. Les résultats restent ici décevants par rapport à l'ambition initiale. La jeunesse des arbres explique en partie cet échec. Les moyens mis en jeu ne permettent pas de détecter de manière fiable et quantifiable les mouvements d'eau dans l'arbre. En effet, les quantités d'eau stockées ou destockées représentent 0,05% à 0,1% du flux traversant l'arbre (Améglio, 1991), or la sensibilité de la méthode flux de sève a pu dans notre étude être estimée au mieux à 2-3% près. C'est une autre méthodologie qu'il nous faudra mettre en place pour pouvoir estimer ces flux d'eau interne. Nous proposerons dans un prochain article de les déterminer à partir des variations de diamètre des différents organes.

## REFERENCES

- Améglio T (1991) Relations hydriques chez le jeune noyer de l'échelle de la journée à celle de l'année en liaison avec quelques aspects de la physiologie de l'arbre. Thèse de l'université Blaise-Pascal, Clermont II. 100 p
- Balding FR, Cunninham GL, Plummer RF (1973) An inexpensive self-contained system for field measurement of gas exchange. *Photosynthetica* 7, 382-386
- Daudet FA (1987) Un système simple pour la mesure *in situ* des échanges gazeux de couverts végétaux de quelques mètres carrés de surface foliaire. *agronomie* 7(2), 133-139
- Greenwood EAN, Beresford JD (1979) Evaporation from vegetation in landscapes developing secondary salinity using the ventilated chamber technique. 1. Comparative transpiration from juvenile *Eucalyptus* above saline ground-water seeps. *J Hydrol* 42, 369-382
- Greenwood EAN, Beresford JD (1980) Evaporation from vegetation in landscapes developing secondary salinity using the ventilated chamber technique. 2. Evaporation from atriplex plantations over a shallow water table. *J Hydrol* 45, 313-319
- Itier B, Cellier P, Riou C (1985) Actual evapotranspiration measurement by a simplified aerodynamic system. In: *Advances in evapotranspiration*. Proc Nat Conf, Chicago, 1985/12/16-17. ASAE Public, No 14-85. Am Soc agric Eng, St Joseph, MI, (USA), 201-207
- McGinn SM, King KM (1990) Simultaneous measurements of heat, water vapour and CO<sub>2</sub> fluxes above alfalfa and maize. *Agric For Meteorol* 49, (4), 331-349
- Perrier A, Itier B, Bertolini JM, Blanco de Pablos A (1975) Mesure automatique du bilan d'énergie d'une culture. Exemples d'application. *Ann Agron* 26 (1), 19-40
- Sakuratani T (1981) A heat balance method for measuring water flux in the stem of intact plants. *J Agric Meteorol* 37 (1), 9-17
- Valancogne C, Nasr Z (1989) Une méthode de mesure du débit de sève brute dans de petits arbres par bilan de chaleur. *agronomie* 9, (6), 609-617
- Valancogne C, Nasr Z (1993) A heat balance method for measuring sap flow in small trees. In: *Water transport in plants under climatic stress*. Proc Int Workshop, Vallombrosa, Florence (I) (M Borghetti, J Grace, A Rachi, eds) Cambridge Univ Press, 166-173