

Note technique

Estimation du flux de sève du kiwi par bilan de chaleur en conditions semi-contrôlées

Sylvia DAYAU(1), Charles VALANCOGNE(1), Dominique MORAND(2) et Jerzy NIZINSKI(2)

(1) Institut National de la Recherche Agronomique-Inra, Centre de Bordeaux
Laboratoire de la bioclimatologie BP. 81 – 33 883 Villenave d'Ornon cedex

(2) Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération
Orstom Département MAA-UR31 - 213 rue La Fayette 75480 Paris cedex 10

RÉSUMÉ

Dans le bilan d'eau du sol d'une savane (végétation éparse) l'exactitude de l'estimation de la transpiration des ligneux est le facteur déterminant la précision d'estimation de l'évapotranspiration réelle totale de la savane. Pour mesurer la transpiration (flux de sève des ligneux) nous avons utilisé la méthode du bilan de chaleur.

Nous faisons un rappel théorique de la méthode, décrivons le dispositif de mesure et présentons quelques résultats concernant des individus de kiwi.

Les résultats nous permettent d'affirmer que la méthode du bilan de chaleur donne des résultats satisfaisants. L'absence d'étalonnage, le pas de temps, et la souplesse de mise en place (capteurs « sur mesure ») sont d'excellents arguments pour que l'on applique cette méthode à l'étude de l'évapotranspiration réelle des savanes.

MOTS CLÉS : Méthode du bilan de chaleur – Flux de sève-kiwi – *Actinidia deliciosa*.

ABSTRACT

MEASURING OF SAP FLOW IN LYSIMETER-GROWN KIWI STEM USING THE HEAT BALANCE METHOD

In a soil-water balance of a savanna (incomplete ground cover) the accuracy of trees transpiration assessment is the main factor of accuracy of total savanna's actual evapotranspiration assessment. In present study the tree transpiration was estimated by measuring sap flow using the heat balance method.

This paper deals with theoretical description of relevant method and its applications to measuring of sap flow in lysimeter-grown kiwi.

On the basis of this study we can recommended that the heat balance method should be adopted for savanna's actual evapotranspiration study: lack of calibration, time resolution and adaptability of set up (« made-to-measure » probes).

KEY WORDS : Heat balance method – Sap flow-kiwi – *Actinidia deliciosa*.

INTRODUCTION

La savane est un couvert se caractérisant par sa non-uniformité horizontale et verticale : une strate herbacée plus ou moins continue et une strate arbustive-arborescente discontinue. Pour estimer l'évapotranspiration réelle totale d'une savane la méthode de l'équation du bilan d'eau du sol est insuffisante en saison sèche (NIZINSKI *et al.*, (1994) ; il faut utiliser d'abord la méthode des cor-

rélations (MONTEITH et UNSWORTH, 1990), puis, pour dissocier la contribution des ligneux à l'évapotranspiration réelle totale de la savane, la méthode du bilan de chaleur permettant de mesurer le flux de sève brute de plantes isolées (transpiration) (VALANCOGNE et GRANIER, 1991).

La méthode du bilan de chaleur a été mise au point par SAKURATANI (1981) pour des annuelles et reprise pour des ligneux par VALANCOGNE et NASR (1989)

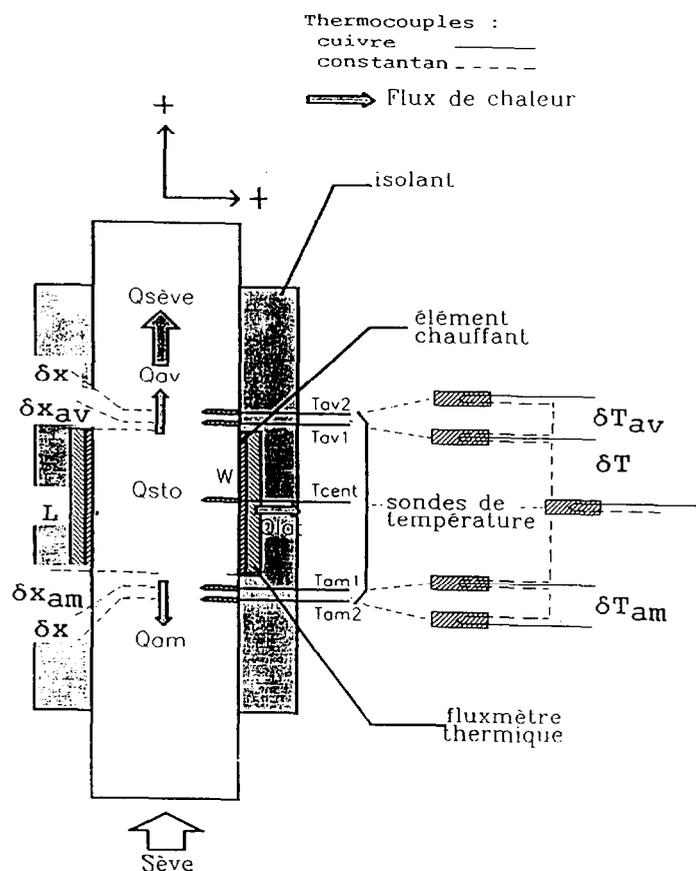


FIG. 1. — Schéma du capteur de flux de sève à bilan de chaleur. L : largeur du ruban chauffant (cm) ; V : volume du tronc pour lequel on calcule le bilan de chaleur (cm^3) ; dx_{am} et dx_{av} : distances entre les thermocouples en aval et en amont du ruban chauffant (cm) ; T_{av} et T_{am} : températures moyennes des sections transversales délimitant le volume du tronc en aval et en amont du ruban chauffant ($^{\circ}\text{C}$) ; T_{cent} : température au milieu de la zone chauffée ($^{\circ}\text{C}$) ; W : flux de chaleur produite par le ruban chauffant (Watt) ; Q_{av} et Q_{am} : flux de chaleur par conduction selon l'axe du bois en aval et en amont du ruban chauffant (Watt) ; Q_{sto} : augmentation du stock de chaleur dans le volume V (Watt) ; Q_{lat} : flux de chaleur par conduction vers l'air environnant (Watt) ; Q_{seve} flux de chaleur par convection associée au flux de sève d_s (Watt).

Structure of a heat balance method system. L : width of heated band (cm) ; V : volume of trunk taken into account in the heat balance method (cm^3) ; dx_{am} et dx_{av} : gaps between the thermocouples below and above of the heated band (cm) ; T_{am1} et T_{am2} : temperatures inside and outside of flowmeter ($^{\circ}\text{C}$) ; T_{cent} : température in the middle of the heated trunk part ($^{\circ}\text{C}$) ; W : flow heat produced by heated band (Watt) ; Q_{av} et Q_{am} : conductive heat flow going a long wood axis below and above of the heated band (Watt) ; Q_{sto} : heat increase in volume of trunk taken into account in the heat balance method (Watt) ; Q_{lat} : conductive heat flow into the air (Watt) ; Q_{seve} : convective heat flow plotted to sap flow, d_s (Watt).

qui discutent différentes hypothèses simplificatrices d'application de cette méthode.

Nous faisons un rappel théorique de la méthode puis décrivons le dispositif de mesure et présentons quelques résultats concernant des individus de kiwi (*Actinidia deliciosa* var. Greensill) ayant poussé en pots.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Théorie de la méthode du bilan de chaleur

Un ruban chauffant est disposé autour d'un volume de tronc ou de branche, la température de ce volume s'élève ; le bilan de chaleur du volume V peut s'écrire (fig. 1) :

$$W = Q_{av} + Q_{am} + Q_{sto} + Q_{lat} + Q_{sève} \quad (\text{Watt}) \quad (1)$$

avec W : flux de chaleur produit par le ruban chauffant (Watt) ; Q_{av} et Q_{am} : flux de chaleur par conduction selon l'axe du bois en aval et en amont du ruban chauffant (Watt) ; Q_{lat} : flux de chaleur par conduction vers l'air environnant (Watt) ; flux de chaleur par convection associée au débit de sève d_s (Watt) ; Q_{sto} : augmentation du stock de chaleur dans le volume de bois V (Watt).

La grandeur recherchée est le flux de sève brute (d_s) lié au flux de chaleur par convection $Q_{sève}$, par la fonction suivante :

$$Q_{sève} = c_v d_s (T_{av} - T_{am}) \quad (\text{Watt}) \quad (2)$$

avec c_v : chaleur volumique de la sève brute, assimilée à l'eau pure, soit $4,18 \cdot 10^6 \text{ J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$; d_s : flux de sève brute estimé par la méthode du bilan de chaleur ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) ; T_{av} et T_{am} : températures moyennes des sections transversales délimitant le volume du tronc en aval et en amont du ruban chauffant ($^\circ\text{C}$), mesurées.

À partir des équations (1) et (2), on peut calculer le flux de sève brute (pour $T_{av} - T_{am} \neq 0$) :

$$d_s = (W - Q_{av} - Q_{am} - Q_{sto} - Q_{lat}) / [c_v (T_{av} - T_{am})] \quad (\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}) \quad (3)$$

sachant que W le flux de chaleur produite par le ruban chauffant est connu et constant, les flux de chaleur par conduction en aval et en amont du ruban chauffant sont respectivement égaux à :

$$Q_{av} = k A_{av} (T_{av1} - T_{av2}) / dx \quad (\text{Watt}) \quad (4)$$

avec k : conductivité thermique du bois ($0,55 \text{ Watt} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$) ; A_{av} : surface de la section transversale du tronc en aval du ruban chauffant (m^2) ; T_{av1} et T_{av2} : températures moyennes mesurées de deux sections transversales très proches (deux thermocouples écartés l'un et l'autre

d'une longueur dx , d'environ $0,5 \text{ cm}$) délimitant le volume du tronc en aval du ruban chauffant ($^\circ\text{C}$).

$$Q_{am} = k A_{am} (T_{am1} - T_{am2}) / dx \quad (\text{Watt}) \quad (5)$$

avec A_{am} : surface de la section transversale du tronc en amont du ruban chauffant (m^2) ; T_{am1} et T_{am2} : températures moyennes mesurées de deux sections transversales très proches (deux thermocouples écartés l'un et l'autre d'une longueur dx) délimitant le volume du tronc en amont du ruban chauffant ($^\circ\text{C}$).

Le flux de chaleur par conduction vers l'air environnant est mesuré par un fluxmètre thermique qui entoure le dispositif (fig. 2).

$$Q_{lat} = -K_{lat} \cdot dT_{lat} \quad (\text{Watt}) \quad (6)$$

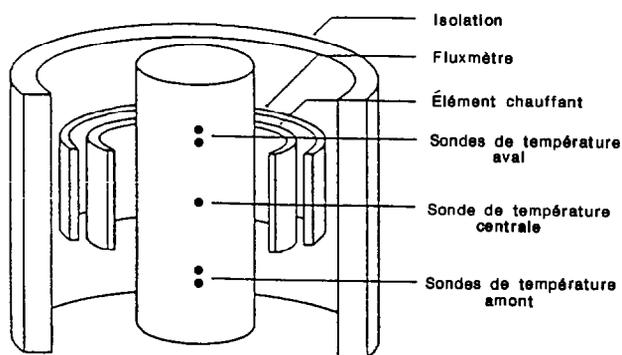


FIG. 2. – Equipement du tronc de kiwi.
Equipment for measuring of sap flow in kiwi stem.

avec K_{lat} : coefficient de conduction du fluxmètre thermique déterminé à partir des minima observés sur plusieurs journées dans des conditions de flux de sève pratiquement nul, en fin de nuit ($\text{Watt} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$) ; dT_{lat} : écart de température entre extérieur et intérieur du fluxmètre ($^\circ\text{C}$). L'augmentation du stock de chaleur dans le volume de tronc V est égal à :

$$Q_{sto} = C_b \cdot V \cdot dT_{cent} / dt \quad (\text{Watt}) \quad (7)$$

avec C_b : chaleur volumique du bois humide ($2,8 \text{ MJoules} \cdot \text{m}^{-3} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$) ; T_{cent} : température au milieu de la zone chauffée ($^\circ\text{C}$) ; dt : pas de temps des mesures (ici 20 minutes).

Les mesures de flux de sève par bilan de chaleur (d_s) ont été validées par des pesées effectuées sur balance électronique mesurant la transpiration (pesée du pot contenant le kiwi dont on connaît d_s). La balance (Sauter E 1210, capacité de pesage 120 kg , précision de 10 g à température ambiante) est reliée à un micro-ordinateur ; les mesures des

variations de poids du container (la transpiration), ont été synchrones à celles du flux de sève, toutes les 20 minutes.

Dispositif des mesures de flux de sève

RÉALISATION DU MATÉRIEL

Le ruban chauffant

On dispose sur un cadre en bois deux rangées de clous formant un rectangle de la dimension de l'élément chauffant (deux fois le diamètre du tronc du kiwi étudié). On enroule un fil de constantan (diamètre de 1 mm) autour des clous alternativement en haut et en bas et on coule un composé en silicone dans ce moule, noyant de façon homogène le fil de constantan (épaisseur totale 1,5 mm) ; puis on place le moule à l'étuve pendant 2 heures à 60 °C.

Le fluxmètre

Sur une feuille de silicone de la dimension du ruban chauffant (16 cm), on dispose une rangée de thermocouples cuivre-constantan respectivement d'un côté puis de l'autre de la feuille.

Les sondes de température

On enferme un thermocouple cuivre-constantan dans respectivement quatre tubes en laiton (2 mm de diamètre), les thermocouples sont reliés entre-

eux et noyés dans la résine époxy afin d'isoler électriquement ces derniers du tube en laiton.

MISE EN PLACE DES CAPTEURS (fig. 2)

On a installé les thermocouples dans l'axe du tronc sur une partie lisse de l'écorce ; on les recouvre par le ruban chauffant puis le fluxmètre. L'ensemble, bien serré contre le tronc est mis sous un isolant thermique.

La centrale d'acquisition de données

Nous avons utilisé une centrale Micrologger 21X (Campbell). Le câblage des capteurs sur la centrale est présenté figure 3. Les températures moyennes des sections transversales délimitant le volume du tronc en aval (T_{av}) et en amont (T_{am}) de l'élément chauffant, les températures de l'extérieur et de l'intérieur du fluxmètre ($T_{lat(1)}$ et $T_{lat(2)}$), la température de référence (T_{cent}) et la tension des capteurs (U) ont été mesurées toutes les vingt minutes.

MATÉRIEL VÉGÉTAL ET LES CONDITIONS D'EXPÉRIMENTATION

La Station de recherches fruitières de l'Inra de Bordeaux, à l'initiative de R. Monet et Y. Bastard a lancé depuis 1990 un programme d'amélioration génétique du kiwi (*Actinidia deliciosa*

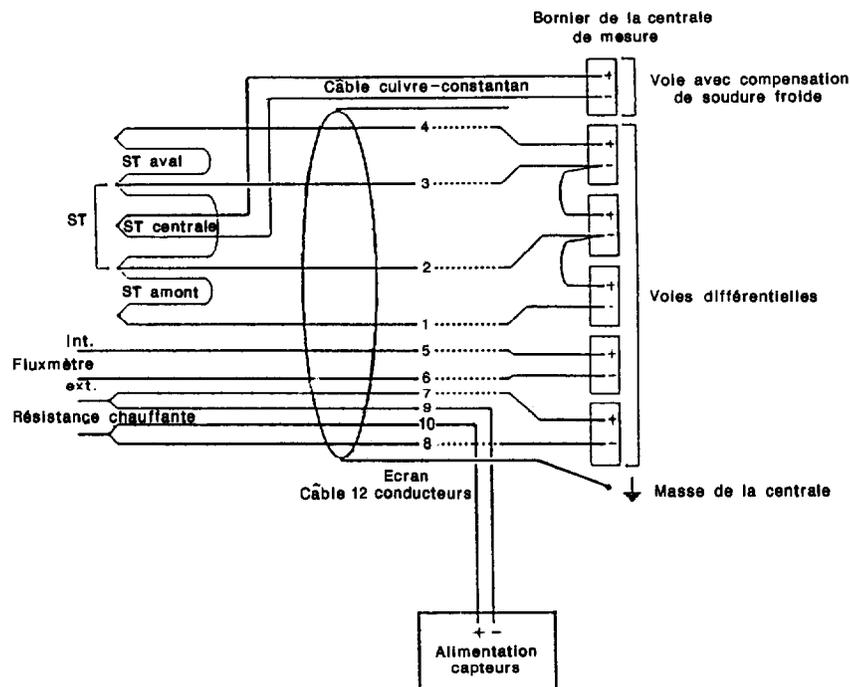


FIG. 3. — Schéma de câblage de la centrale d'acquisition de données Micrologger 21X (Campbell).
Wiring diagram for 21X Micrologger (Campbell).

var. Greensill), l'objectif étant de créer un porte-greffe qui fournirait un hybride capable de résister aux fortes gelées hivernales (CHAT *et al.*, 1992). *A. deliciosa* var. Greensill est originaire de régions soumises à un climat chaud et humide avec moussons (FERGUSON, 1990). D'après VANNIERE et POLIDORI (1992) *A. deliciosa* régule peu l'ouverture des stomates : les résistances stomatiques d'individus bien irrigués sont de 1 s.cm^{-1} en milieu de journée, elles atteignent 2 s.cm^{-1} chez des individus très stressés en eau ; il existe une transpiration nocturne qui représenterait 20 % de la transpiration journalière en cas de vent sec (résistances stomatiques de 4 à 6 s.cm^{-1}). *A. deliciosa* semble être très sensible aux excès d'eau et se comporterait comme une plante en état de manque d'eau 24 heures après la saturation du sol. *A. deliciosa* est une espèce ligneuse qui peut avoir une forte transpiration (environ 100 litres par plante et par jour), la conductance hydraulique du xylème est très élevée ($2,7$ à $7,2 \times 10^{-7} \text{ m}^2.\text{Pa}^{-1}.\text{s}^{-1}$ d'après DAVISON, 1990) et de ce fait elle se prête bien au suivi du flux de sève brute par la méthode du bilan de chaleur.

Le kiwi étudié provient de la collection de la

Station de Recherches fruitières de l'Inra de Bordeaux. L'individu étudié a été repiqué dans un container de $0,1 \text{ m}^3$ en 1990, au moment des mesures il mesurait environ 2 m avec un tronc de 2,7 cm de diamètre et était en phase d'expansion foliaire (indice foliaire (LAI) évoluant de 0,25 à 0,70 de LAI_{max} au cours des mesures). Pour les mesures, le container a été installé sur une balance dans une serre, à proximité d'une station météorologique (mesures en continu du rayonnement global à l'extérieur (Rg_{ext}) et intérieur (Rg_{serre}) de la serre). Le sol (sable fin) du container a été maintenu humide à une teneur en eau proche de la capacité au champ donc à un niveau de stress hydrique négligeable. La dose d'irrigation journalière maximale reconstitue la réserve utile sans provoquer de drainage (on amène le sol à la capacité au champs en début de journée). La valeur d'une dose est égale à la transpiration journalière (24 heures) de la veille des mesures, soit :

$$I = \text{Tr} + \text{Es} + \text{D} + \text{dR}/\text{dt} \quad (\text{cm}^3.\text{jour}^{-1}) \quad (8)$$

avec I : irrigation, en $\text{cm}^3.\text{j}^{-1}$; Tr : transpiration, en $\text{cm}^3.\text{j}^{-1}$ (transpiration calculée à partir de la

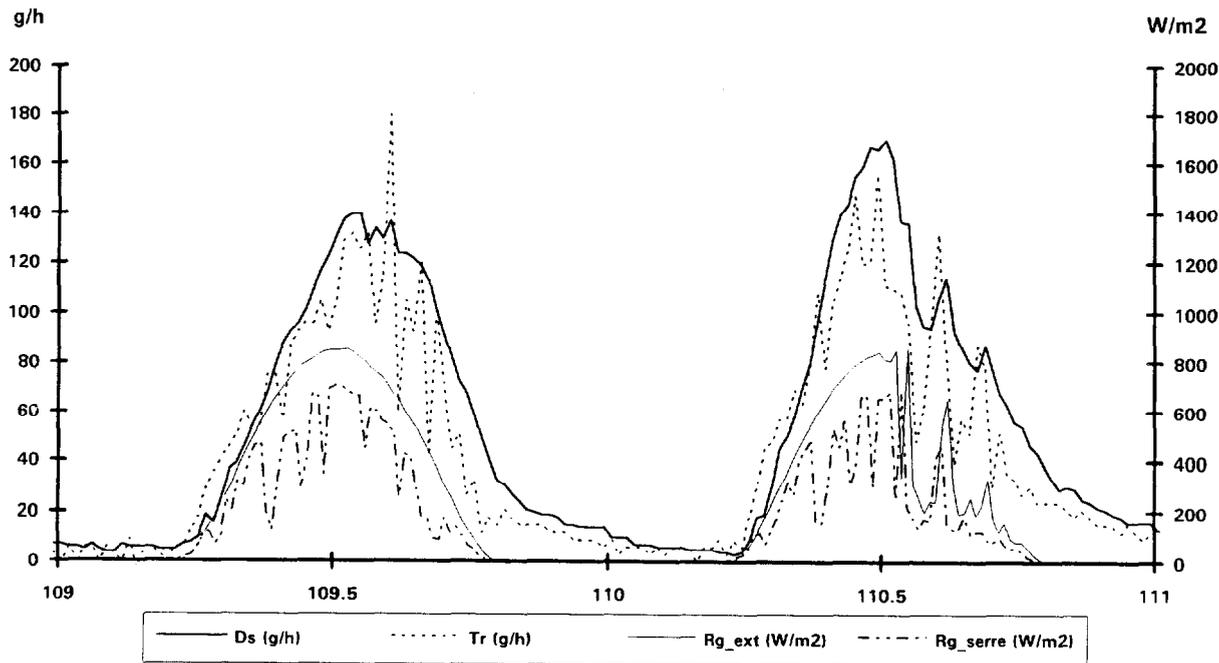


FIG. 4. – Flux de sève du kiwi (*Actinidia deliciosa*) ds ($\text{cm}^3.\text{heure}^{-1}$) par bilan de chaleur, et par pesées Tr ($\text{cm}^3.\text{heure}^{-1}$). Rayonnement global extérieur (Rg_{ext}) et intérieur (Rg_{serre}) à la serre (W.m^{-2}). Sap flow in kiwi stem (*Actinidia deliciosa*) using the heat balance method (ds, $\text{cm}^3.\text{hour}^{-1}$) and weighing (Tr, $\text{cm}^3.\text{hour}^{-1}$), Global irradiation outside (Rg_{ext}) and inside (Rg_{serre}) of greenhouse (W.m^{-2}).

balance) ; E_s : évaporation du sol égale à $0 \text{ cm}^3 \cdot \text{j}^{-1}$, car un écran protecteur supprime l'évaporation de l'eau du sol ; D : drainage, en $\text{cm}^3 \cdot \text{j}^{-1}$; dR : variation de la réserve en eau du sol, en cm^3 ; dt : pas de temps de calcul, en jours.

RÉSULTATS, DISCUSSION ET CONCLUSION

Nous présentons un exemple de mesures concernant des plantes sans stress hydrique lors de deux journées bien ensoleillées (19 et 20 avril 1993 ; rayonnement global maximal à l'extérieur de la serre ($R_{g_{\text{ext}}}$) de $850 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$) : les cinétiques journalières de la transpiration d'*A. deliciosa* obtenues par bilan de chaleur (d_s – flux de sève, en $\text{cm}^3 \cdot \text{heure}^{-1}$) et par pesée (Tr – transpiration par pesée, en $\text{cm}^3 \cdot \text{heure}^{-1}$), les cinétiques du rayonnement global à l'extérieur et à l'intérieur de la serre (fig. 4). Avec des valeurs horaires de transpiration d'environ $60 \text{ cm}^3 \cdot \text{heure}^{-1}$, les cinétiques de d_s et Tr sont proches : confondues jusqu'à environ midi, elle se décalent ensuite, ici dans l'exemple de la figure 4 en faveur de d_s (allant jusqu'à 25 % de Tr). Suivant les journées, ce décalage est négligeable ou se fait en faveur de Tr . Ce décalage laisse supposer l'existence d'une hydromasse localisée entre le point de mesure du flux de sève et les feuilles (hydromasse dont on ne maîtrise pas les variations de volume). Il faudrait faire plusieurs points de mesures de d_s sur le tronc et sur chaque branche et parallèlement suivre l'évolution de la résistance stomatique et des grandeurs susceptibles

d'agir sur les mouvements stomatiques (éclairage, déficit de saturation de l'air, température, potentiel hydrique des feuilles). Par ailleurs le coefficient de conduction du fluxmètre thermique (K_{lat}) augmente régulièrement au cours de la période d'expérimentation : K_{lat} est égal à $1,30 \text{ Watt} \cdot \text{°C}^{-1}$ du 8 au 19 avril et à $1,43 \text{ Watt} \cdot \text{°C}^{-1}$ du 10 avril au 4 mai 1993. Cette augmentation est probablement due à la croissance du tronc du kiwi qui devrait être suivie en parallèle. L'ensemble de ces mesures pourraient se faire sous deux régimes contrastés : stress hydrique « négligeable » (humidité du sol proche de la capacité au champs) et stress hydrique « sévère » (humidité du sol proche du point de flétrissement permanent).

Ces résultats nous permettent néanmoins d'affirmer que la méthode du bilan de chaleur proposée par VALANCOGNE et NASR (1989) et révisée par VALANCOGNE et GRANIER (1991). Pour mesurer le flux de sève des ligneux est satisfaisante. L'absence d'étalonnage, le pas de temps (20 minutes) et la souplesse de mise en place (capteurs « sur mesure ») sont de bons arguments pour que l'on applique cette méthode à l'étude de l'évapotranspiration réelle des savanes (végétations éparées) pour lesquelles l'exactitude de l'estimation de la transpiration des ligneux est le facteur déterminant la précision d'estimation de l'évapotranspiration réelle totale de la savane.

Manuscrit accepté par le Comité de rédaction le 14 avril 1994.

BIBLIOGRAPHIE

- CHAT (J.), BONNET (A.) et MONET (R.), 1992. – Sélection de porte-greffe résistant au gel. *L'Arboriculture fruitière*, 456 : 52-55.
- DAVISON (R.M.), 1990. – The physiology of the kiwifruit vine. In : I.J. Warrington and G.C. Weston (Editeurs), *Kiwifruit : Science and management*, Ray Richards Publisher, New Zealand Society for horticultural Science, Auckland, : 127-155.
- FERGUSON (A.R.), 1990. – Botanical nomenclature : *Actinidia chinensis*, *Actinia deliciosa*, and *Actinidia setosa*. In : I.J. Warrington and G.C. WESTON (Editors), *Kiwifruit : Science and management*, Ray Richards Publisher, New Zealand Society for Horticultural Science, Auckland : 36-57.
- MONTEITH (J.L.) et UNSWORTH (M.H.), 1990. – *Principles of environmental physics*. 2^e éd., Edward Arnold, London, 291 p.
- NIZINSKI (J.), MORAND (D.) et FOURNIER (Ch.), 1994. – Actual evapotranspiration of a thorn scrub with *Acacia tortilis* and *Balanites aegyptiaca* (North Senegal). *Agricultural and Forest Meteorology* (sous presse).
- SAKURATANI (T.), 1981. – A heat balance method for measuring water flow in the stem of intact plant. *Journal of Agricultural Meteorology*; 37 : 9-17.
- VALANCOGNE (C.) et NASR (Z.), 1989. – Une méthode de mesure du débit de sève brute dans de petits arbres par bilan de chaleur. *Agronomie*, 9 : 609-617.
- VALANCOGNE (C.) et GRANIER (A.), 1991. – Intérêt des méthodes thermiques de mesure du flux de sève pour l'étude du bilan hydrique des savanes. In : M.V.K. SIVAKUMAR, J.S. VALLACE, C. RENARD et C. GIRAUX (Editeurs), *Soil water balance in the Sudano-Sahelian zone*. Proceedings of the Niamey Workshop, IAHS Publ. n° 199 : 387-400.
- VANNIERE (M.-P.) et POLIDORI (J.-J.), 1992. – L'alimentation hydrique de l'*Actinidia*. *L'Arboriculture fruitière*, 456 : 32-34.