

Mesures thermiques des flux de sève et comportement hydrique des arbres. III. Influence sur les flux de sève des modalités d'apport d'eau en irrigation localisée sur sol fissuré

B Cabibel

avec la participation technique de Jacque Horoyan

INRA, station de science du sol, domaine Saint-Paul, BP 91, 84143 Montfavet Cedex, France

(Reçu le 4 juillet 1991; accepté le 1^{er} octobre 1991)

Résumé — L'analyse des flux de sève mesurés par voie thermique dans le tronc et les racines de pommiers, couplée à l'étude des transferts de l'eau dans le sol, est utilisée pour étudier le transfert de celle-ci dans le système sol-plante en fonction des conditions de mise en œuvre de l'irrigation localisée sur sol fissuré. L'influence du débit d'irrigation et de la teneur en eau du sol au déclenchement de l'apport d'eau est étudiée quant à leurs conséquences sur la morphologie et le fonctionnement des zones de sol humectées, l'intensité de la fonction puits racinaire et son évolution dans le temps, la satisfaction des besoins en eau et l'état hydrique résultant des arbres. On montre que ces paramètres sont fonction de l'adéquation débit d'apport - état structural initial du sol au déclenchement de l'apport d'eau qui commande l'extension relative de la zone saturée sous goutteur pour un état structural donné. On propose, pour approcher une meilleure efficacité de l'apport d'eau en sol fissuré, 2 stratégies de mise en œuvre de l'irrigation localisée selon l'état d'humectation initiale du sol au déclenchement de l'irrigation.

Malus = pommier / flux de sève / mesure thermique / transfert hydrique / sol / racine / irrigation localisée

Summary — **Thermal measurement of sap flow and hydric behavior in trees. III. Influence on sap flow of trickle irrigation in cracked soil.** A thermal method for measuring sap flow in apple-tree trunks and roots, combined with a water soil transfer study has been utilized to investigate water transfer in a soil-plant system according to varying conditions under which trickle irrigation was set up in cracked soil. The influence of water flow and initial soil-water content before the irrigation system was set up has been studied with regard to water content, water pressure distribution in a wetted soil zone, sap flow intensity and its evolution over time and the resulting hydric status of trees. It has been shown that these parameters depend on adequation flow-initial structural soil status before the irrigation system is set up. This relationship determines the relative extension of the water-saturated zone under drip-irrigation for a given cracked soil status. Two strategies for setting up trickle irrigation according to a given initial water soil content have been proposed with the aim of obtaining optimal irrigation efficiency.

Malus = apple tree / sap flow / thermal measurement / water transfer / soil / root / trickle irrigation

INTRODUCTION

L'irrigation localisée présente, par rapport aux autres méthodes d'apport d'eau aux cultures, un ensemble d'avantages technologiques et agronomiques aujourd'hui reconnus. Elle minimise, théoriquement, les pertes par drainage, et elle maintient, dans le temps, une eau toujours très disponible dans l'espace du sol où s'exerce l'activité racinaire potentiellement maximale. De ce fait, en permettant de mieux adapter, notamment en automatisation, les ap-

ports aux besoins instantanés de la plante, l'irrigation localisée est susceptible d'améliorer de façon importante l'efficacité de l'eau apportée.

Ces bénéfices potentiels ne deviendront néanmoins effectifs que si l'on dispose, pour mettre en œuvre l'apport d'eau, d'une excellente connaissance des conditions de transfert de cette dernière dans le sol, de l'intensité et de la localisation de la fonction puits racinaire et de leurs conséquences sur la culture et la récolte dans un ensemble sol-plante-atmosphère donné.

Ces connaissances ne sont qu'exceptionnellement réunies, notamment en sol gonflant. Cette insuffisance de données explique l'empirisme qui prévaut encore le plus souvent aujourd'hui lors de la mise en œuvre *in situ* de ce type d'apport d'eau aux cultures. Elle est aussi à l'origine des répercussions négatives, parfois importantes sur la production, qu'induit souvent l'introduction de cette technique culturale dans la pratique agricole, notamment en arboriculture fruitière sur sol fissuré.

Dans ces sols, la porosité structurale et ses variations en fonction du degré de désaturation en eau du milieu deviennent, en effet, déterminantes sur les modalités de transfert de l'eau apportée. Ce dernier, ne répondant plus généralement aux lois définies en milieu continu, conduit, par transfert convectif dans les fissures lors des phases initiales de l'irrigation, à une répartition très hétérogène de l'eau apportée dont dépendront la morphologie et l'extension des zones de sol mouillées et la répartition du champ de pression de l'eau à l'intérieur des «bulbes humides» créés. De ces paramètres, très dépendants de l'état structural initial du sol lors du déclenchement de l'apport d'eau, résulteront *in fine* le fonctionnement des zones de sol humectées et de la fonction puits racinaire des arbres et donc, pour une contrainte climatique donnée et une dose d'irrigation apportée, le niveau d'alimentation en eau des arbres et leur état hydrique résultant.

De nombreux auteurs ont montré que la mise en œuvre de différentes méthodes thermiques permettait de quantifier, dans le tronc des arbres, le flux global de sève traversant la plante en fonction de la demande climatique (Cohen *et al.*, 1981; Granier, 1985; Valancogne et Nasr, 1989). Nous avons ultérieurement montré qu'il était également possible, par voie thermique, de quantifier simultanément dans le tronc et les racines des arbres non seulement le flux global mais également ses composantes, paramètres intégrant en continu et à un pas de temps court, l'équilibre instantané existant entre la demande climatique subie par le verger et la disponibilité locale de l'eau à l'interface sol-racine (Cabibel et Do; 1991a, b). Cette approche des flux de sève doit donc permettre de juger des différences induites par les diverses modalités de mise en œuvre de l'apport d'eau à la surface du sol sur le niveau d'extraction de l'eau d'irrigation par les racines et donc sur l'efficacité de l'irrigation elle-même.

Dans ce qui suit nous présentons des résultats concernant :

- les comportements hydriques relatifs de pommiers irrigués en localisation, sous débits différents ou maintenus secs, comportements hydriques appréhendés au travers des cinétiques de flux de sève horaires et des évapotranspirations journalières traversant les arbres,

- les relations existant entre les comportements hydriques des arbres et les différents fonctionnements des zones de sol humectées, fonctionnements induits soit par des débits différents d'apport d'eau, le sol présentant un état structural initial identique, soit par des états de fissuration initiaux variables, l'humidité du sol au déclenchement de l'apport d'eau étant différente, le débit restant identique.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Matériel

Le sol

Le sol, non travaillé depuis la plantation du verger, est constitué par les alluvions modernes argilocalcaires de la Durance (tableau I). La nature des argiles confère à ce sol des propriétés de retrait-gonflement lors des variations de sa teneur en eau. Dès que celle-ci devient inférieure à la teneur en eau à la capacité au champ ($\theta \approx 0,33 \text{ cm}^3 \text{ d'eau/cm}^3 \text{ de sol}$), des fissures se développent pouvant présenter rapidement de grandes dimensions. Aux plus faibles teneurs en eau mesurées *in situ* ($0,14 < \theta < 0,22 \text{ cm}^3 \text{ d'eau/cm}^3 \text{ de sol}$) correspondent des valeurs de porosité structurale supérieures à 20 %, représentant plus de 40 % de la porosité totale. Les fissures atteignent alors 80–100 cm de profondeur. La maille de fissuration principale, mesurée en surface, est de l'ordre de 14 cm.

La conductivité hydraulique saturée, mesurée *in situ* sous infiltration à charge constante dans l'horizon 0-100 cm, est trouvée égale à $0,36 \text{ cm.h}^{-1}$. L'infiltrabilité du sol, trouvée respectivement égale à 74, 42 et 31 cm.h^{-1} pour des teneurs en eau moyennes de 0,24, 0,27 et $0,30 \text{ cm}^3 \text{ d'eau/cm}^3 \text{ de sol}$ dans l'horizon de surface 0-50 cm (Bon, 1986), montre l'importance des transferts convectifs susceptibles d'exister en sol fissuré.

Le verger

Planté en 1979 et conduit en haie fruitière palissée, il est constitué de 4 rangs de 40 arbres, Reines des Reinettes greffées sur EM IX. Les arbres sont distants de 1 m, les rangs de 3,5 m. L'irrigation localisée, installée à la plantation, est conduite par goutteurs, posés au sol sur la raie de plantation, à raison d'un goutteur par arbre sis à mi-distance de 2 arbres consécutifs. L'ap-

Tableau I. Propriétés physiques du sol; dispositifs de mesure de la teneur et du potentiel de l'eau du sol.

Profondeur (Z(cm))	Argiles (%) < 2 μ	Limons (%)		Sables (%)		Saturation moyenne (%)
		2-20 μ	20-50 μ	50-200 μ	> 200 μ	
0-30	35,3	40,5	11,5	9,8	3,2	41,0
30-50	38,9	41,3	10,9	7,7	2,2	44,0
50-100	39,7	50,1	6,3	3,0	0,9	41,0
100-130	26,9	30,9	11,7	19,7	8,3	38,0

Dispositifs de mesure de l'état hydrique du sol

Neutronique		Tensiométrique			
D (cm)	P (cm)	D (cm)	P (cm)	D (cm)	P (cm)
0	205	0	5	25	15
12	205	0	75	25	55
25	205	0	125	25	75
38	205	10	5	35	15
44	205	10	15	50	25
70	205	15	45	50	55
88	205	15	100	75	15
100	205				
125	205				

D = distance au goutteur; P = profondeur.

○○○○○○○○○○ Sec	○○○○○○○○○○ 4 l.h ⁻¹	○○○○○○○○○○ 2 l.h ⁻¹	○○○○○○○○○○ 4 l.h ⁻¹
○○○○○○○○○○ 2 l.h ⁻¹	○○○○●○○○○ 4 l.h ⁻¹	○○○○●○○○○ Sec	○○○○●○○○○ 2 l.h ⁻¹
○○○○○○○○○○ 4 l.h ⁻¹	○○○○●○○○○ 2 l.h ⁻¹	○○○○●○○○○ 4 l.h ⁻¹	○○○○●○○○○ Sec
○○○○○○○○○○ 2 l.h ⁻¹	○○○○○○○○○○ Sec	○○○○○○○○○○ 2 l.h ⁻¹	○○○○○○○○○○ 4 l.h ⁻¹

A

● : Arbres étudiés

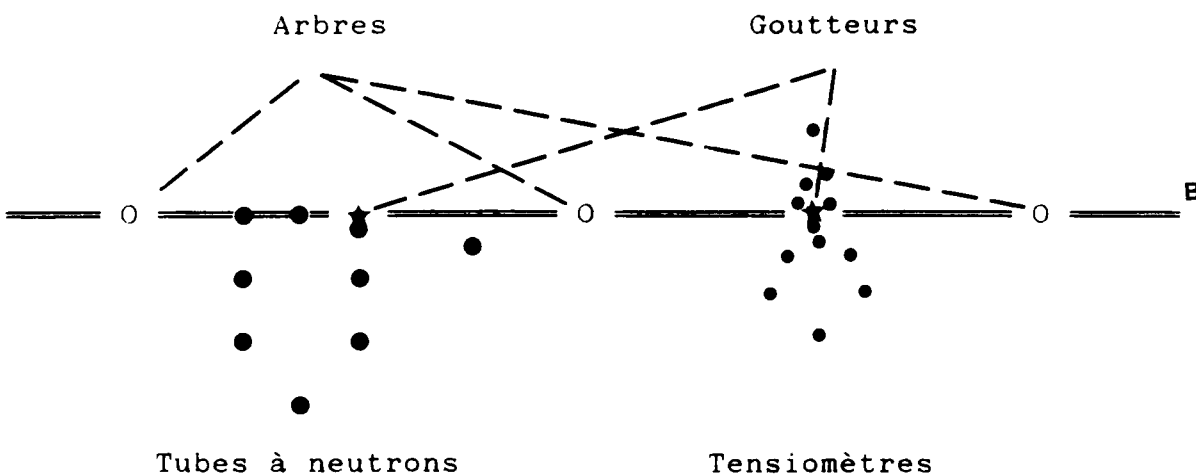


Fig 1. Dispositif expérimental : verger expérimental (A), dispositif d'arrosage et systèmes de mesure (B).

port d'eau est journalier. Il est déclenché à 10 h GMT. Les débits appliqués sont de 2 l.h⁻¹ et 4 l.h⁻¹. La dose d'eau, égale pour tous les traitements, est fixée à 0,8 ETP du jour précédent. Pour le calcul de la dose d'eau à apporter on ne comptabilise les précipitations que dans la limite de 30 mm. Des arbres témoins non irrigués sont associés aux traitements irrigués (fig 1).

Méthodes de mesures

Le climat du verger

Les données climatologiques (températures humide et sèche, rayonnements, vitesse du vent et précipitations) nécessaires au suivi horaire de la demande climatique (ETP) sont obtenues, au sein même du verger, à l'aide d'une station météorologique automatique de type Cimel-Enerco 295-100. L'ETP horaire est calculée par traitement des données à l'aide d'un logiciel basé sur la formule de Penman, où ont été reformulées les fonctions rayonnement net et vitesse du vent à l'échelle de temps considérée, le calcul de l'ETP et le logiciel ayant été élaborés par la station de bioclimatologie et le STEFCE de Montfavet.

Détermination spatio-temporelle des teneurs en eau et des potentiels de l'eau du sol

Les mesures de teneurs en eau aux différentes cotes en fonction du temps, $\theta(z_n, t)$, sont obtenues par humidimétrie neutronique, la sonde utilisée étant un humidimètre-densimètre NEA. Chaque dispositif de mesure, mis en place à la plantation du verger, comporte un réseau de tubes d'accès pour sonde à neutrons dont l'implantation permet une scrutation tridimensionnelle des teneurs en eau, centrée sur l'axe vertical passant par le goutteur réel (parcelle irriguée) ou fictif (parcelle sèche). On dispose, dans chaque système de mesures, de 9 tubes dont les axes verticaux sont distants de 12, 25, 38, 44, 70, 88, 100 et 125 cm du goutteur, le premier tube de scrutation étant à la verticale du goutteur (tableau I). Le pas vertical de mesure est de 10 cm. La profondeur totale de scrutation est de 205 cm. Les étalonnages neutroniques ont porté sur les couches 0-15 cm, 15-55 cm, 65-165 cm et 165-205 cm, couches dont les limites ont été fixées après analyse du profil pédologique. La précision sur la mesure de la teneur en eau est estimée à $\pm 0,01$ cm³ d'eau par cm³ de sol. Un réseau de tensiomètres permet, dans chaque placette irriguée étudiée, de mesurer l'évolution spatio-temporelle des potentiels de l'eau du sol, nécessaire pour préciser les limites des zones saturées et non saturées créées sous irrigation ainsi que l'existence de drainages profonds (tableau I). La relation d'étalonnage a été réalisée *in situ* (Bon, 1986).

Comportement hydrique des arbres - Mesure des flux

Les flux sont mesurés dans les troncs et les racines avec une méthode thermique décrite précédemment (Granier, 1985; Cabibel et Do, 1991a). Six arbres sont étudiés à raison de 2 arbres par traitement, chaque arbre appartenant à une placette expérimentale distincte. Sur chaque arbre la mesure des flux est effectuée dans le tronc et sur une racine dont la direction de croissance est telle qu'elle inclut le bulbe hydrique réel créé sous irrigation ou fictif (traitement non irrigué) dans sa zone d'absorption potentielle pour l'eau. Cette condition d'expérimentation a été contrôlée et vérifiée, *a posteriori*, par étude, *in situ*, du profil racinaire. Les diamètres de l'ensemble des troncs étudiés sont équivalents. Le diamètre moyen, hors écorce, est égal à $72,6 \pm 1,9$ mm. Pour les racines, les diamètres sont différents d'un traitement à l'autre, mais équivalents pour les racines appartenant à un même traitement. Les diamètres moyens sont respectivement égaux à 42,5 mm, 23,7 mm et 23,2 mm dans les traitements 4 l.h⁻¹, 2 l.h⁻¹ et non irrigué. Les flux horaires et journaliers sont respectivement donnés avec une incertitude relative inférieure à 15% et 10% (Cabibel et Do, 1991a).

RÉSULTATS

Analyse des flux de sève

Les résultats présentés sont obtenus dans la période précédant l'irrigation, période de préirrigation (5 juillet), puis 24 et 28 j après le déclenchement de l'apport d'eau (6 et 10 août). Les demandes climatiques cumulées sont alors égales à 200 et 220 mm par rapport au jour de préirrigation étudié. Les flux horaires sont exprimés en ml.h⁻¹, les flux cumulés en mm, la surface au sol attribuée à chaque arbre étant de 3,5 m², et les densités de flux racinaires en ml.h⁻¹.cm⁻². Les résultats présentés, flux moyens calculés pour l'organe considéré des 2 individus testés dans chaque traitement sont, pour chaque période de temps analysée, caractéristiques du fonctionnement des arbres dans les traitements respectifs.

Période de préirrigation

La disponibilité en eau du sol étant élevée, les potentiels de l'eau du sol étant, dans l'ensemble de la parcelle, faibles en valeurs absolues, les cinétiques de flux instantanés, synchrones dans les 3 traitements, sont, dans les troncs, sous la

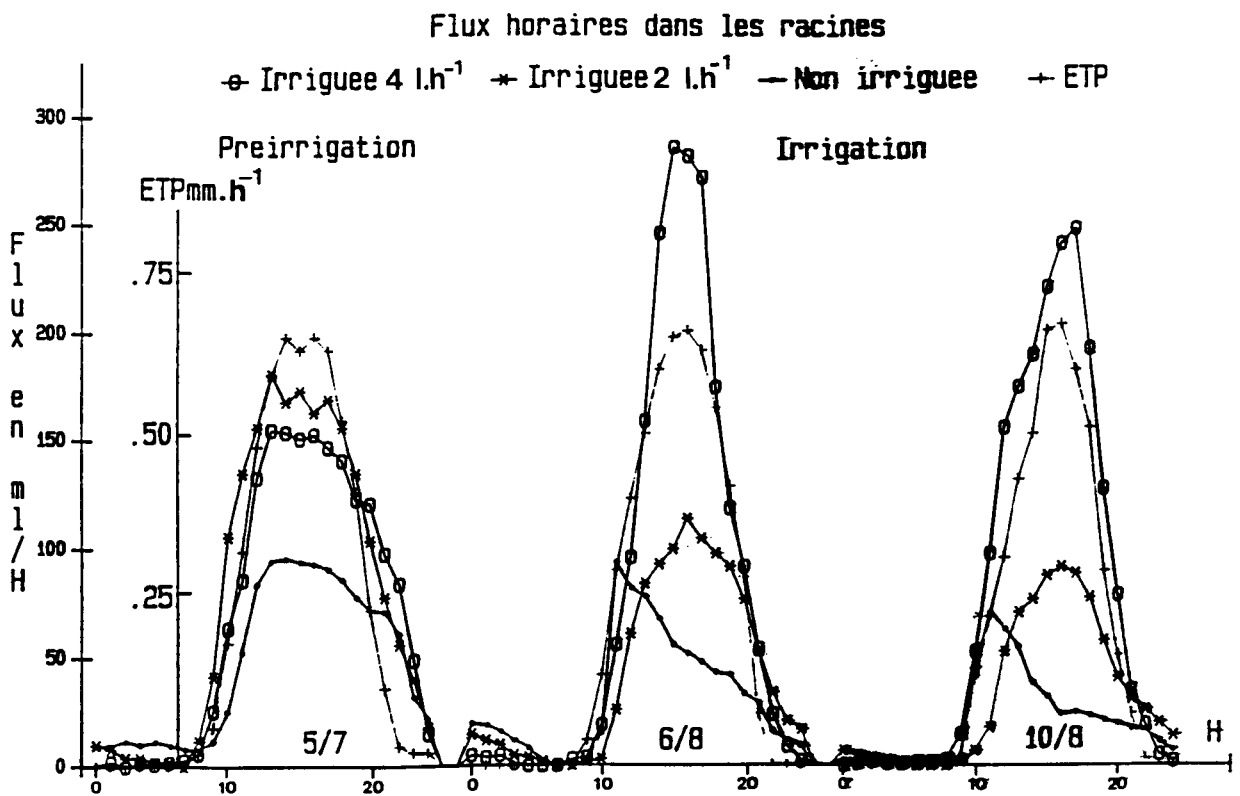
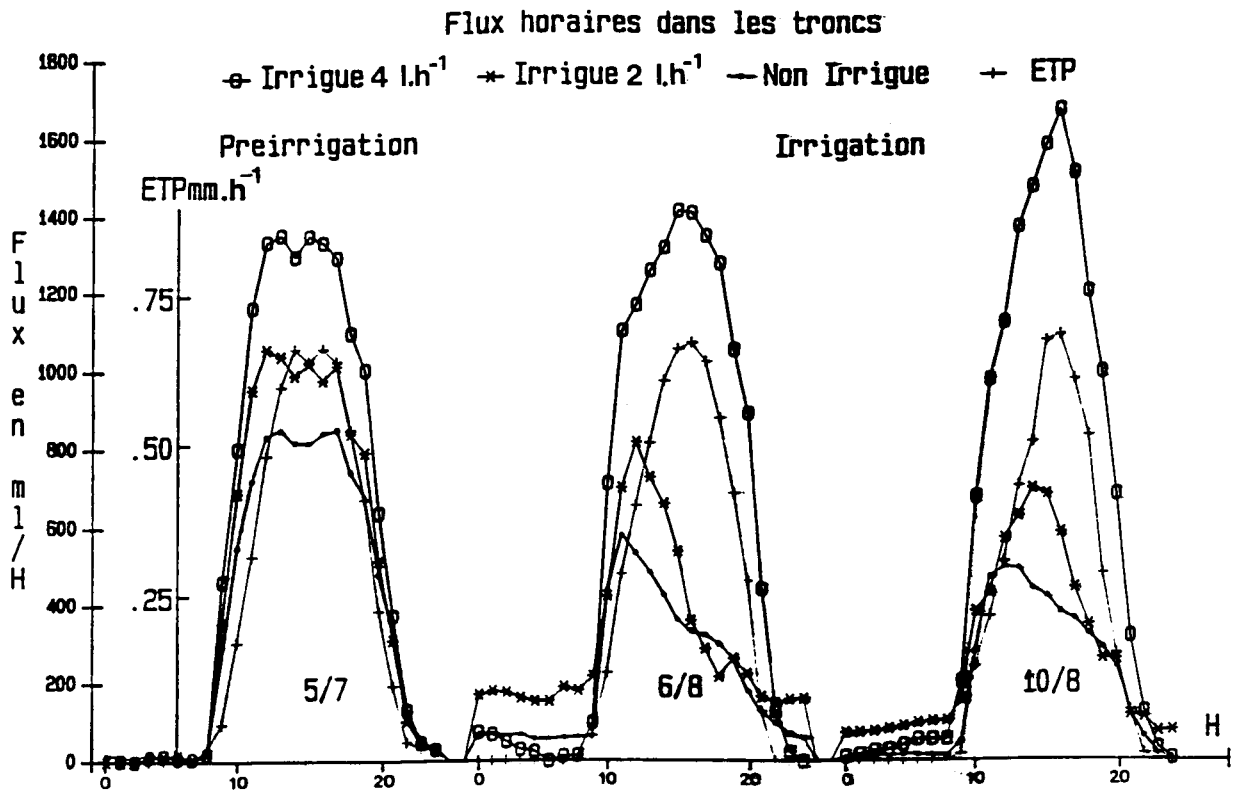


Fig 2. Evolution des flux horaires dans les troncs et les racines avant et pendant l'irrigation.

Tableau II. Évolution des flux horaires (ml.h^{-1}), des flux cumulés (mm), des densités de flux racinaires DFR ($\text{ml.h}^{-1}.\text{cm}^{-2}$) et de leurs rapports avant et après déclenchement de l'irrigation.

<i>Flux horaires moyens en ml.h^{-1} et densités racinaires (DFR) en $\text{ml.h}^{-1}.\text{cm}^{-2}$ sur période d'ETP maximale ETP horaire moyenne (12–16 h) = 65 mm.h^{-1}</i>							
Trait	Préirrigation			Irrigation			
	Tronc	Racine	DFR	Tronc	Racine	DFR	
4 l.h ⁻¹	1 333	153	10,8	1 584	277	16,7	
21 l.h ⁻¹	1 004	171	38,8	570	90	20,3	
Sec	831	95	22,5	386	27	6,4	

<i>ETP en mm, flux cumulé en mm et en % de l'ETP</i>							
Date	ETP	4 l.h ⁻¹		2 l.h ⁻¹		Sec	
5 juill	5,70	3,96	69%	3,08	54%	2,61	46%
6 août	5,93	3,94	66%	1,99	34%	1,41	24%
10 août	4,70	4,08	87%	1,87	40%	1,30	28%

<i>Rapports des flux horaires dans les troncs et les racines, des densités de flux racinaires et des flux cumulés</i>				
Période	Paramètre	4 l.h ⁻¹ / 21 l.h ⁻¹	4 l.h ⁻¹ / sec	2 l.h ⁻¹ / sec
Préirrigation	Tronc ml.h^{-1}	1,338	1,604	1,208
	Racine	0,895	1,615	1,800
	DFR	0,278	0,480	1,724
	Flux cumulé	1,280	1,510	1,180
Irrigation	Tronc ml.h^{-1}	2,778	4,104	1,477
	Racine	3,077	10,259	3,333
	DFR	0,823	2,609	3,172
	Flux cumulé	2,180	3,140	1,440

dépendance de l'évolution de la demande climatique subie par le verger (fig 2). L'amplitude des flux est fonction de l'ETP et, pour une contrainte donnée, est fonction du passé cultural des arbres qui a gouverné leur développement respectif. Les flux instantanés et cumulés (tableau II) sont plus importants pour les arbres qui ont été antérieurement irrigués et pour ces derniers, ils croissent avec le débit d'apport de l'eau à l'irrigation. On donne au tableau II les valeurs des flux instantanés les plus importants, moyennés sur les h de plus forte ETP (12-16 h), les flux cumulés pour le jour considéré (5 juillet) ainsi que les différents rapports existant entre les flux dans les 3 traitements analysés.

Dans les racines, si les évolutions des flux horaires (fig 2) sont identiques à celles existant

dans les troncs, donc synchrones de l'évolution de la demande climatique, l'amplitude des flux horaires et les densités de flux racinaires sont indépendantes du passé cultural de l'arbre (tableau II). Elles ne dépendent que de la disponibilité relative instantanée et locale de l'eau du sol. Pour les racines étudiées, si les flux racinaires sont maximaux en traitement irrigué 2 l.h⁻¹ et minimaux en traitement non irrigué (fig 2), les densités de flux deviennent minimales en traitement 4 l.h⁻¹ (tableau II).

Période d'irrigation

Pour une contrainte climatique instantanée donnée, l'intensité des flux de sève est, dans le temps, respectivement d'autant plus élevée et

leurs cinétiques nyctémérales sont d'autant plus synchrones de celle de l'ETP que l'arbre est irrigué et que le débit d'irrigation est fort.

Dans les arbres non irrigués, l'intensité des flux, dans les troncs et les racines (fig 2), diminue avec la teneur en eau du sol. Les flux maximaux apparaissent d'autant plus précocement et sur des périodes d'autant plus courtes par rapport aux maxima de l'ETP que le sol se dessèche (Cabibel et Do, 1991b). L'allure de plus en plus tronquée des cinétiques de flux révèle l'intensification des stress hydriques dans les arbres.

Dans la période d'irrigation, les intensités des flux horaires dans les troncs (fig 2) et des flux cumulés (tableau II) sont, à demande climatique égale, toujours plus faibles dans les arbres soumis à un apport d'eau réalisé sous 2 l.h^{-1} . Sous ce débit les évolutions nyctémérales des flux présentent souvent une allure tronquée, mettant en évidence des stress hydriques importants dans les arbres. Ce phénomène apparaît notamment lorsque l'intensité de l'ETP est forte dans ses phases initiales. Inversement, sous fort débit d'irrigation les cinétiques des flux sont toujours synchrones de celles de la demande climatique.

Dans les racines les flux horaires subissent, par rapport à ceux mesurés en période de préirrigation et pour une même contrainte climatique, une évolution inverse dans les 2 traitements (fig 2). Sous faible débit d'apport d'eau, les flux diminuent fortement alors qu'ils augmentent de façon importante sous débit fort d'irrigation (tableau II).

L'analyse des divers paramètres caractérisant l'évolution des transferts de sève brute dans les arbres (tableau II) montre de plus qu'à dose d'eau apportée égale, les écarts de flux s'accroissent au profit des arbres irrigués sous 4 l.h^{-1} , au cours de la période de culture et d'irrigation. Par rapport à la période de préirrigation les rapports des flux maximaux, des flux racinaires et des flux totaux, mesurés dans les 2 traitements irrigués en période d'irrigation, sont respectivement multipliés par 2,08, 3,44 et 1,70 en faveur du traitement 4 l.h^{-1} . Inversement l'irrigation, sous faible débit d'apport d'eau, n'accroît que peu les flux, par rapport à ceux mesurés dans les arbres non irrigués. Les rapports précédemment indiqués ne sont multipliés respectivement que de 1,22, 1,85 et 1,22 en faveur des arbres irrigués à faible débit par rapport à ceux maintenus en sec.

Conclusion partielle

Les comportements hydriques des arbres sont, sur ce sol fissuré, directement liés à l'existence

ou non de l'irrigation et aux modalités de mise en œuvre de l'apport d'eau. Pour une même dose d'eau journalière apportée, l'alimentation hydrique des arbres est d'autant mieux assurée, pour une contrainte climatique donnée, que l'irrigation est conduite sous un débit élevé. Sous débit faible, l'irrigation est peu efficace sur les flux hydriques traversant les arbres, par rapport à ceux existant dans les arbres non irrigués, des stress hydriques pouvant de plus apparaître, dans les arbres ainsi irrigués, avec une fréquence élevée.

Morphologie et fonctionnement des bulbes humides créés dans le sol sous irrigation

Effet de la teneur en eau initiale du sol

On donne en figure 3A les accroissements de teneur en eau mesurés dans les zones de sol humectées, créées dans le sol présentant 3 états d'humidité initiale différents au déclenchement de l'apport d'eau. Les mesures sont obtenues après 10 j d'irrigation apportant une même dose d'eau sous un même débit de 2 l.h^{-1} . Les teneurs moyennes initiales en eau de la couche de surface (0–30 cm) sont respectivement égales à 21, 25 et $30 \text{ cm}^3 \text{ d'eau/cm}^3 \text{ de sol}$.

L'analyse morphologique et hydraulique des bulbes humides créés montre que plus la teneur initiale en eau du sol est faible au déclenchement de l'irrigation:

- plus sont de faibles dimensions les volumes totaux de sol humectés. On a estimé les volumes des bulbes, créés sous les 3 humidités initiales considérées par valeurs croissantes, à respectivement 0,41, 0,66 et $0,75 \text{ m}^3 \text{ de sol mouillé}$ (tableau III),

- plus la zone saturée sous goutteur est profonde et proportionnellement importante. La circulation de l'eau devenant essentiellement gravitaire, les risques de drainage profond s'accroissent et l'extension de l'espace humecté non saturé, seul espace potentiellement adapté à une extraction efficace de l'eau par les racines de l'arbre (Cabibel, 1978 ; Habib, 1978) diminue. Corrélativement les réserves en eau pouvant être créées par irrigation, pour une même dose d'eau apportée, deviennent plus faibles (tableau III),

- plus les champs de teneurs en eau sont hétérogènes.

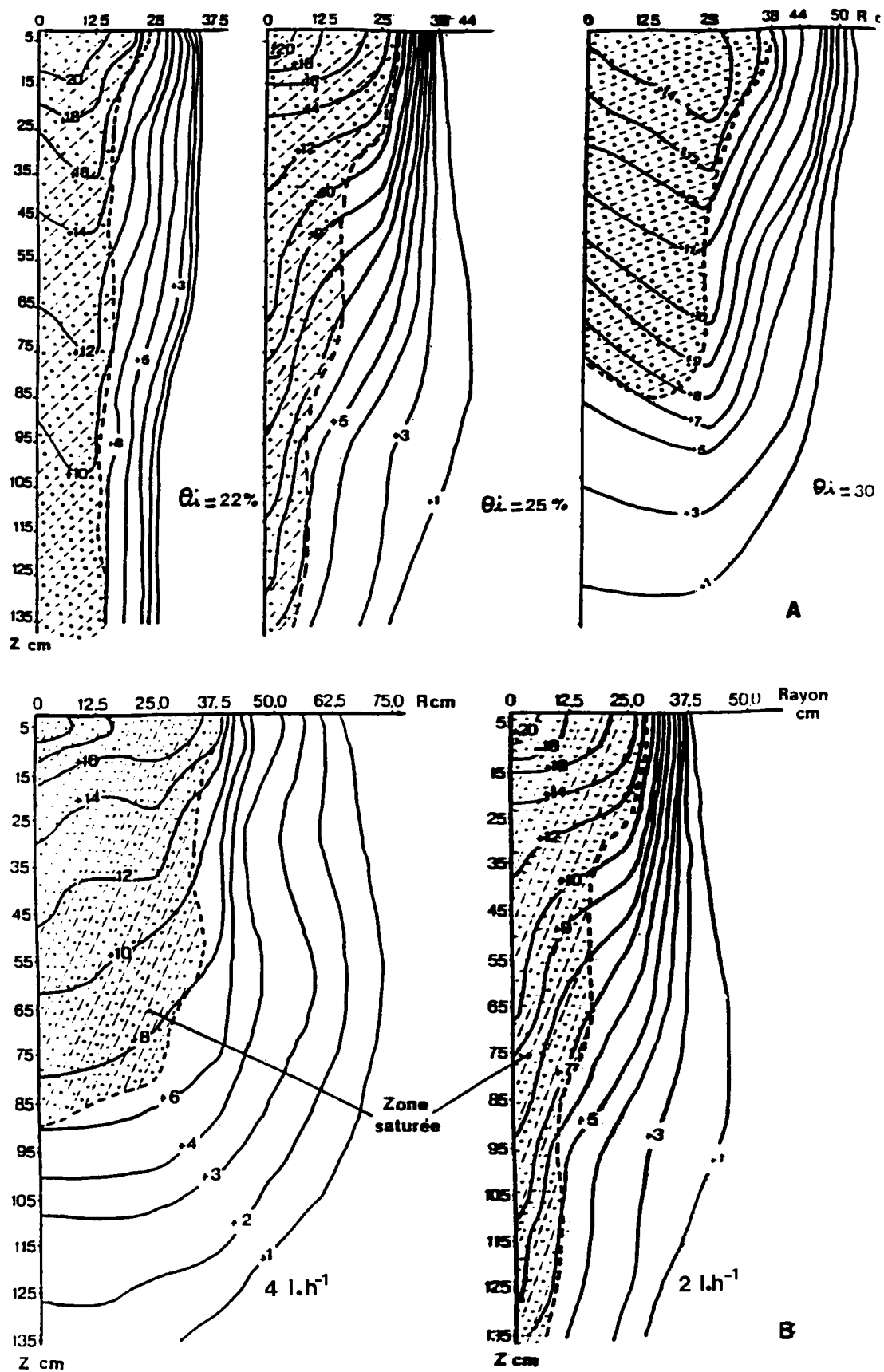


Fig 3. Accroissement des teneurs en eau dans le sol sous irrigation localisée en fonction de l'humidité initiale du sol (A) et du débit d'apport d'eau (B).

Tableau III. Volumes de sol humectés (m^3) et réserves en eau du sol disponibles (l) sous irrigation.

<i>Effet humidité initiale du sol</i>			
<i>Humidité initiale</i>	22%	25%	30%
Volume total	0,409	0,657	0,745
Volume saturé	0,112	0,129	0,164
Volume non saturé	0,297	0,528	0,581
Réserves totales	34	38	54
Réserves en zone non saturée	17	23	26

<i>Effet débit d'irrigation</i>		
<i>Débit</i>	2 l.h ⁻¹	4 l.h ⁻¹
Volume total	0,657	1,697
Volume saturé	0,129	0,282
Volume non saturé	0,528	1,415
Réserves totales	38	80
Réserves en zone non saturée	23	47

Effet du débit

L'analyse spatio-temporelle des distributions de $\theta(z, t)$ dans les bulbes humides créés (fig 3B), après 10 j d'irrigation sous les 2 débits utilisés, la dose d'eau étant égale et l'humidité initiale du sol étant identique ($\theta_i = 25 \text{ cm}^3 \text{ d'eau/cm}^3 \text{ de sol}$), montre que l'accroissement du débit d'apport de l'eau au sol conduit à :

- une augmentation importante du volume total de sol mouillé et notamment de sa composante non saturée : les volumes des bulbes créés sous irrigation sont respectivement estimés à 1,70 et 0,66 m^3 , les zones saturées à 1,42 et 0,54 m^3 , sous les débits de 4 l.h⁻¹ et 2 l.h⁻¹ (tableau III),
- une répartition homogène de l'eau apportée,
- une minimisation, voire une absence des risques de drainage profond, l'enveloppe de la zone de sol saturée sous gouteur devenant une surface fermée incluse dans la zone d'enracinement maximal des arbres. Il en résulte un accroissement relatif des réserves en eau disponibles pour l'extraction racinaire par rapport à une dose d'eau apportée (tableau III).

Sous le débit maximal l'estimation des réserves, en absence de drainage constaté, conduit à l'évaluation d'une évapotranspiration journalière moyenne pour les arbres de ce traitement de l'ordre de 3,7 mm, estimation proche de celle déduite des mesures de flux de sève (tableau II). Ces mêmes mesures, en traitement 2 l.h⁻¹, conduisant à des flux cumulés journaliers

moyens de l'ordre de 2 mm, confirment, sous ce traitement, l'existence de drainages importants de l'eau d'irrigation hors de la zone d'activité racinaire. La quantité d'eau drainée, hors de la zone de mesure qui comprend celle d'enracinement maximal des arbres, est comprise entre 35 et 40 % de l'eau apportée.

Conclusion partielle

La morphologie et le fonctionnement des bulbes hydriques créés dans le sol sous irrigation localisée sont sous la dépendance simultanée du débit d'apport d'eau et de l'humidité initiale du sol au déclenchement de l'irrigation. Ces paramètres conditionnent la répartition des champs des teneurs en eau et des potentiels, l'extension relative des zones saturée et non saturée et donc de la zone potentiellement active pour l'extraction racinaire ainsi que l'importance des drainages de l'eau d'irrigation hors de la zone racinaire. Dans le sol considéré l'optimisation de l'apport d'eau est réalisée sous le plus fort débit utilisé.

Interrelations fonctionnement des bulbes humides dans le sol - intensité des flux de sève

L'analyse simultanée des transferts d'eau dans le sol et des flux de sève montre que l'alimentation en eau des arbres paraît devoir être d'autant mieux assurée que les conditions initiales de l'irrigation induisent, à la surface du sol sous gouteur, une zone d'alimentation en eau de grande extension qui localise la zone humectée saturée dans les horizons superficiels du profil de sol; l'efficacité de l'irrigation est alors d'autant plus élevée. Les résultats obtenus montrent en effet que, plus ces conditions sont approchées, plus sont importantes les zones d'activité potentielle pour l'extraction racinaire de l'eau du sol et plus sont grandes les réserves en eau constituées par irrigation.

Dans le système sol-plante étudié, l'optimisation de l'ensemble de ces paramètres apparaît maximale sous le plus fort débit d'apport d'eau (4 l.h⁻¹), et pour l'humidité initiale du sol la plus élevée ($\theta = 30 \%$), conditions d'apport d'eau pour lesquelles on obtient simultanément l'extension maximale de la zone d'alimentation sous gouteur et les fonctions puits racinaires les plus élevées pour une demande climatique donnée.

L'extension de cette zone peut être attribuée à plusieurs phénomènes agissant simultanément :

– une réduction de l'infiltrabilité initiale du milieu par gonflement des colloïdes du sol, gonflement d'autant plus grand que l'humidité initiale du sol est élevée. Diminuant les transferts convectifs profonds, toute réduction de la porosité structurale, conduira dès lors, pour un débit d'apport et une dose d'eau donnée, à un plus grand étalement de l'eau d'irrigation sur la surface du sol,

– une saturation d'autant plus rapide des fissures sous goutteur que le débit instantané d'apport est grand, saturation qui permet à l'eau apportée d'intéresser une plus grande surface de sol et donc un plus grand nombre de fissures principales. Cette élévation du nombre de fissures participant initialement au transfert convectif de l'eau ayant pour conséquence la réduction du trajet moyen diffusif pour l'eau dans les monolithes de sol délimités par les mailles de fissuration principales, conduira à une réduction corrélative plus rapide de la porosité structurale initiale par suite d'un gonflement simultané d'un plus grand nombre de volumes élémentaires de sol humectés. Il résultera de ce mécanisme une extension plus rapide de la zone d'alimentation sous goutteur.

Cet ensemble de phénomènes induira *a posteriori*, lors de la phase initiale de tout nouvel apport d'eau, un accroissement supplémentaire de la zone d'alimentation en surface, conséquence d'une réduction presque totale des flux convectifs profonds sous goutteur.

Conclusion partielle

En sol ayant des propriétés de retrait-gonflement, c'est donc de l'adéquation débit d'apport - état structural du sol au déclenchement de l'apport d'eau que dépendront *in fine*, pour une dose d'eau donnée, la fonction puits racinaire des arbres, leurs flux instantanés et totaux et leurs états hydriques résultants.

L'analyse des résultats montre que, si l'humidité du sol, préalablement à l'apport d'eau, est telle qu'elle induit une porosité structurale d'origine fissurale importante, le débit des goutteurs devra être déduit des propriétés hydrodynamiques mesurées dans le milieu discontinu à irriguer. Il sera généralement élevé de façon à créer sous goutteur une zone d'alimentation de grandes dimensions, devant nécessairement recouvrir plusieurs mailles de fissuration principales. Inversement, si l'humidité initiale du sol est telle que sa porosité structurale correspond à celle existant avant fissuration du sol, le débit d'apport d'eau utilisé pourra être déduit des pro-

priétés hydrodynamiques du sol, déterminées sur milieu continu.

On devra, de plus, tenir compte pour la détermination du débit des goutteurs des critères liés aux caractéristiques des systèmes racinaires à irriguer (morphologie, profondeur d'enracinement) et des contraintes techniques existant au niveau de la parcelle et de l'exploitation agricole.

CONCLUSION

L'analyse, par voie thermique, des flux de sève, dans les troncs et les racines des arbres, couplée à l'étude du transfert dans le sol de l'eau distribuée par irrigation localisée à la surface d'un sol fissuré, a permis de montrer que l'efficacité de l'irrigation dépend essentiellement de l'adéquation débit d'apport - état structural initial du sol au déclenchement de l'apport d'eau. Cette adéquation qui commande l'extension relative de la zone d'alimentation en eau en surface par rapport à celle de la maille de fissuration principale, gouverne simultanément la morphologie et le fonctionnement de la zone de sol humectée par irrigation et l'intensité de la fonction puits racinaire des arbres. *In fine*, de la qualité de cette adéquation, dépendront la satisfaction des besoins en eau de la plante et son état hydrique résultant pour une demande climatique et une dose d'eau données. Les résultats obtenus montrent que l'alimentation hydrique des arbres est maximale si l'irrigation crée à la surface du sol sous goutteur une zone d'alimentation dont l'extension est grande par rapport à celle de la maille de fissuration principale.

La mesure des flux de sève permettant, de plus, de caractériser les composantes de la fonction puits racinaire des arbres et leurs fonctionnements relatifs en fonction des diverses disponibilités instantanées locales de l'eau du sol aux divers interfaces sol-racines, doit permettre de caractériser l'hétérogénéité spatiale de cette fonction puits induite par les diverses modalités de mise en œuvre en verger de ce type d'apport d'eau.

RÉFÉRENCES

- Bon M (1986) Caractérisation hydrodynamique d'un sol gonflant; Application à l'irrigation localisée. Diplôme de maîtrise d'hydrogéologie, USTL Montpellier
- Cabibel B (1978) Influence du mode d'irrigation sur la structure et le fonctionnement du système racinaire

- de jeunes pommiers. *CR séances Acad Agric Fr*, 616-624
- Cabibel B, Do F (1991a) Mesures thermiques des flux de sève et comportement hydrique des arbres : I- Méthode d'estimation et validation des mesures. *Agronomie* 11, 669-678
- Cabibel B, Do F (1991 b) Mesures thermiques des flux de sève et comportement hydrique des arbres : II- Evolution dans le temps des flux de sève et comportement hydrique des arbres en présence ou non d'une irrigation localisée. *Agronomie* 11, 757-766
- Cohen Y, Fuchs G, Green GC (1981) Improvement of the heat pulse method for determining sap flow in trees. *Plant Cell Environ* 4, 391-397
- Do F (1986) Estimation des flux racinaires et du comportement hydrique du pommier sous irrigation localisée en sol fissuré. Mémoire de fin d'études, ENITA, Bordeaux
- Granier A (1985) Une nouvelle méthode pour la mesure des flux dans le tronc des arbres. *Ann Sci For* 45, 193-200
- Habib R (1978) Absorption du ^{32}P dans le cadre d'un essai d'irrigation localisée sur verger de pommiers. Mémoire de DEA d'agronomie, option pédologie. USTL, ENSAM, INRA Montfavet
- Valancogne C, Nasr Z (1989) Une méthode de mesure du débit de sève brute dans des petits arbres par bilan de chaleur. *Agronomie* 9, 609-617