

# Flux de sève et consommation en eau d'*Acacia tortilis* dans le Nord Ferlo

**Frederic Do,**  
Ecophysiologiste

**Alain Rocheteau,**  
Métrologue et électronicien

**Amadou Lamine Diagne,**  
Ecophysiologiste

**Michel Grouzis,**  
Ecologiste

## ■ Introduction

*Acacia tortilis* est une espèce ligneuse clé des écosystèmes et agro-systèmes des zones les plus arides d'Afrique (White, 1983). Mais les études écophysiologiques sur son adaptation à l'aridité et son fonctionnement hydrique sont rares (Fagg et Greaves, 1990) et se limitent à la caractérisation du fonctionnement foliaire durant quelques journées (Ullman, 1989). L'approche exploratoire menée initialement par le laboratoire d'Écologie Végétale de l'Orstom à Dakar a permis d'identifier plusieurs caractères potentiels d'adaptation (Nizinski *et al.*, 1994; Fournier, 1995; Berger *et al.*, 1996; Diouf, 1996) : exploitation latérale des réserves hydriques du sol, feuillage caduc, fermeture stomatique précoce, ajustement osmotique. Ces travaux ont souligné l'intérêt d'une approche plus quantitative du fonctionnement hydrique global pour progresser dans

l'étude et ensuite analyser les conséquences sur les interactions arbre-herbe. Pour les différents systèmes agroforestiers tropicaux, le besoin de quantification est systématiquement retrouvé lors du bilan des connaissances (Sanchez, 1995). Une approche quantitative en continu du fonctionnement hydrique global est devenue possible grâce aux méthodes thermo-électriques de mesure des flux de sève brute (Valancogne et Granier, 1993).

L'objet du présent travail est donc, par l'intermédiaire de la mesure des flux de sève, de quantifier la consommation en eau d'un individu moyen et de préciser la contribution du pivot racinaire au cours de la saison. De plus, on essaiera d'identifier les relations entre la dynamique saisonnière des flux et les déterminismes majeurs que sont la demande évaporative, la phénologie foliaire et la disponibilité en eau.

## Matériels et méthodes

### *Site d'étude*

Le site d'étude se localise dans la zone sylvo-pastorale du Nord Ferlo, dans le nord du Sénégal. Le climat de la région est sahélien *sensu stricto* avec une moyenne des précipitations annuelles de 282 mm (1918-1990, Dagana) affectée d'un coefficient de variation élevé (37 %) (Akpo, 1993). La saison des pluies s'étale sur environ 2 à 3 mois entre juillet et septembre. Les températures maximale et minimale de l'air sont de 41° et 22 °C dans le mois le plus chaud (mai) et de 31 et 14 °C dans le mois le plus frais (janvier). L'évapotranspiration potentielle est en moyenne de 2031 mm an<sup>-1</sup>.

Le paysage de la zone se caractérise par des formations dunaires de faible amplitude, non orientées, délimitant de petites dépressions fermées. Le peuplement végétal représente une steppe très ouverte à épineux constituée d'une strate herbacée, principalement composée de graminées annuelles, parsemée d'arbres et d'arbustes en densité

plus élevée dans les dépressions (Poupon, 1980). La strate arborescente est principalement composée d'*Acacia tortilis* (Forsk.) Hayne ssp. *raddiana* (Savi) Brenan, de *Balanites aegyptiaca* (L.) Del et de *Boscia senegalensis* (Pers.) Lam. La densité moyenne de ligneux est de 124 individus ha<sup>-1</sup> avec pour les trois espèces, la proportion d'individus et le recouvrement des couronnes au sol suivants : *Acacia tortilis*, 22 et 24 % ; *Balanites aegyptiaca*, 31 et 13 % ; *Boscia senegalensis*, 44 et 2 % (Akpo, 1993), soit un recouvrement global relativement élevé de 38 %. Le site expérimental se situe à proximité du village de Souilène (16°20'39"N, 15°25'40"W), il englobe sur 1 ha le haut d'une dune jusqu'au bas de pente, la ligne de plus grande pente du site étant de 1,6 %. On a choisi d'étudier spécifiquement un bosquet de 3 individus d'*Acacia tortilis* de taille moyenne et une surface herbacée hors couvert. Les arbres ont en moyenne une hauteur de 7 m, une circonférence au sol de 0,64 m ( $\pm 0,05$ ) et une surface projetée de la couronne de 30 m<sup>2</sup> ( $\pm 10,8$ ).

Le sol appartient au groupe des sols « Diéri », sols brun-rouges, faiblement évolués, formés sur matériau sableux pauvre en argile (Maignien, 1965). Les teneurs moyennes en sable, argile, matière organique, azote et phosphore total (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) sont respectivement de 90 %, 6 %, 1,8 ‰, 0,15 ‰, 0,3 ‰ dans le premier mètre de sol. Le sol est profond et relativement homogène jusqu'à la profondeur maximale explorée (4,0 m). La profondeur de la nappe phréatique se situerait aux environs de 40 m d'après le puits fonctionnel à proximité du site.

## Mesure des flux de sève

### Principe

La densité de flux de sève brute est mesurée par la méthode de Granier (1985, 1987). Le principe est que la circulation de la sève refroidit par convection une sonde chauffée à puissance constante. Le capteur est constitué de deux aiguilles contenant des thermocouples Cuivre/Constantan montés en opposition. Elles sont insérées radialement dans le bois ou xylème, au delà du cambium. Un écart de 10 cm environ sépare l'aiguille chauffée de la deuxième aiguille en amont du flux, qui a pour objet de suivre la température

du milieu avant chauffage. La décroissance de l'écart de température entre les deux sondes est reliée à la densité de flux par une formule empirique, validée en laboratoire sur de nombreuses espèces et des matériaux poreux synthétiques :

$$J_u = 4,284 [(dT_o - dT_u) / dT_u]^{1,231}$$

avec  $J_u$ , densité de flux de sève en  $l \cdot dm^{-2} \cdot h^{-1}$ ;  $dT_o$ , écart de température maximal à flux nul en ( $v$  (40( $v/^\circ C$ )));  $dT_u$ , écart de température en présence de flux. Le flux de sève total traversant l'organe conducteur est alors estimé par la relation :  $F_u = J_u * S_a$  avec  $S_a$ , surface d'aubier ou surface conductrice totale en  $dm^2$ .

D'une journée à l'autre, les variations du contenu en eau de la partie aérienne des arbres sont négligées et la transpiration journalière est assimilée au flux de sève total cumulé sur 24 heures. La précision relative des flux journaliers est estimée à 10 % (Cabibel et Do, 1991a).

Les fluxmètres de Granier ont été pour une part fournis par la société UP (Ruffinistr. 16, 80637 Munchen) et pour une autre part, fabriqués au laboratoire à Dakar.

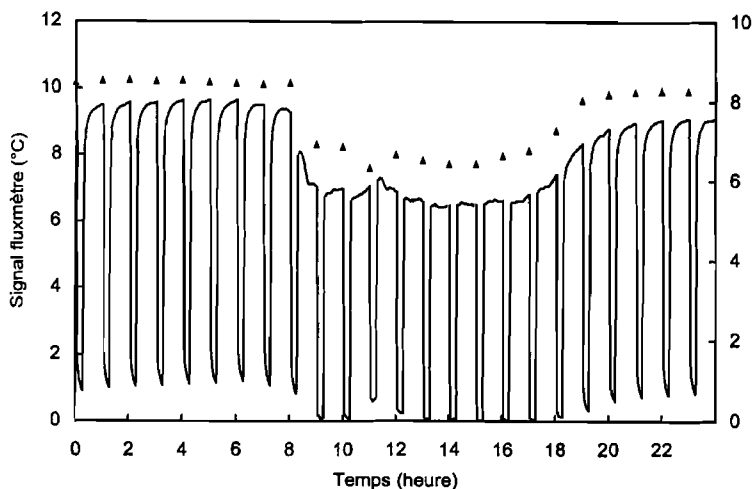
### Échantillonnage

La densité de flux de sève dans les troncs est évaluée à partir de l'insertion de 3 fluxmètres disposés à  $120^\circ$  (Nord, Nord-Est, Sud-Est) à environ 1,25 m du sol sur chacun des 3 arbres. Chaque fluxmètre est protégé du rayonnement direct par un déflecteur. La densité de flux dans les pivots racinaires est suivie à partir de l'insertion de 2 fluxmètres à environ -0,60 m, nettement sous le départ des racines primaires de surface, sur chacun des 3 arbres. Une excavation de 1 m de diamètre sur 1 m de profondeur autour du tronc a été réalisée pour permettre l'installation et le contrôle de l'état du matériel. Elle est recouverte par des panneaux amovibles.

Les flux totaux sont obtenus en affectant à la densité moyenne des flux dans le tronc ( $n = 9$ ) et dans le pivot racinaire ( $n = 6$ ) les surfaces conductrices estimées par des relations statistiques établies avec le diamètre extérieur. Les valeurs moyennes de surface s'avèrent équivalentes entre les troncs ( $1,75 dm^2$ ) et les pivots racinaires ( $1,82 dm^2$ ), ce qui souligne le diamètre important des pivots.

### Correction des gradients de température

Les cinétiques de contrôle réalisées en absence de chauffage de la sonde « chaude » révèlent que l'hypothèse d'une température équivalente entre les deux niveaux d'insertion des sondes n'est pas vérifiée dans les conditions d'étude. Un gradient positif de 0,5 à 1,0 °C apparaît systématiquement la nuit, il s'annule voire devient négatif le jour. Ce gradient ne peut être négligé, car il induit en particulier une surestimation de dTo dont les conséquences sur les valeurs de flux peuvent être très importantes. Dans l'exemple de la figure 1, sans correction, ce phénomène conduit à une surestimation de la densité de flux de 86 %. Ce problème, inhérent à des situations de forts rayonnements à l'intérieur des couverts et de proximité du sol, a déjà été signalé (Do, 1987). La correction par l'intermédiaire de corrélations avec des paramètres climatiques (Cabibel et Do, 1991a; Guttierrez *et al.*, 1994) est lourde et peu adaptée à des suivis de longue durée. La nouvelle méthode proposée est illustrée par la figure 1. La mesure de dTu brut, réalisée à l'heure juste, est suivie d'une coupure du chauffage durant 15 minutes avec mesure du gradient final, ce qui permet de calculer



■ Figure 1

Exemple du signal du fluxmètre de Granier avec coupure périodique du chauffage. Coupures durant 15 minutes pour la mesure du gradient vertical de température effectuée le 28 novembre 1995 (capteur 39SO; scrutation 2 min 30 s).

(-) dTu brut; (▲) dTu corrigé

automatiquement un  $dTu$  corrigé pour chaque capteur. Le choix des durées de chauffage et de coupure résulte d'une optimisation fondée sur des tests *in situ*. La procédure est permise par l'introduction, dans le circuit d'alimentation des résistances, de relais commandés par une centrale (Campbell Ltd, 21X).

Les écarts maxima de température à flux nul se stabilisent après une décroissance à une valeur caractéristique de chaque système capteur-bois environ 20 jours après installation.

### ***Mesures climatiques et évapotranspiration potentielle (ETP)***

Les données climatiques (température, humidité relative, rayonnement global, vitesse du vent et précipitation) sont enregistrées localement avec un pas de temps horaire.

L'évapotranspiration potentielle de référence est calculée à l'échelle journalière selon la formule de Penman avec les coefficients adaptés à la zone pour la formule de Brunt (Riou, 1975 ; Choïsnel *et al.*, 1992).

### ***Mesure de l'humidité du sol et estimation de l'évapotranspiration réelle (ETR)***

L'humidité du sol est suivie jusqu'à 4,0 m de profondeur par mesure neutronique (humidimètre SOLO 25, Nardeux S.A., Les Ulis, France). Un étalonnage gravimétrique unique est utilisé entre 0,10 et 4,00 m ( $R^2 = 0,985$ ,  $n = 30$ ). La densité apparente qui varie entre 1,45 et 1,55 sur le profil, a été déterminée par mesure gamma (gamma-densimètre CPN 501, Campbell Pacific Nuclear Ltd, Martinez-CA, USA). Le profil hydrique à la capacité au champ a été obtenu par expérience de ressuyage *in situ* (stock moyen sur 1,0 m : 78 mm). Les profils hydriques à -1,6 MPa sont obtenus à partir des mesures sur échantillons à pF 4,2 (stock moyen sur 1,0 m : 25 mm). Le dispositif suivi présente 3 tubes sous couvert et 3 tubes hors couvert. Les mesures sont réalisées périodiquement tous les mois en saison sèche et tous les 15 jours en saison des pluies.

L'évapotranspiration réelle (ETR) est estimée par l'intermédiaire d'un bilan hydrique simplifié du sol sur la tranche 0 - 4,00 m,

négligeant le ruissellement, le drainage et les remontées capillaires :

$$\text{ETR} = P - dS_{0-4,0}$$

avec P, précipitations cumulées entre les deux dates de mesure ;  $dS_{0-4,0}$ , variation de stock hydrique (final - initial). Les ETR sous couvert et hors couvert sont obtenues à partir de la moyenne des 3 tubes.

### *Suivi de la phénologie foliaire*

Selon le même rythme que le suivi hydrique, les stades phénologiques de l'ensemble des individus d'*Acacia tortilis* de la parcelle contrôlée (40) sont décrits selon la méthode visuelle proposée par Grouzis et Sicot (1980). Pour la feuillaison, ce sont V1 : bourgeonnement, pas de feuilles développées ; V2 : début de feuillaison, bourgeons foliaires et feuilles épanouies sur plus de 10 % et moins de 50 % des rameaux ; V3 : pleine feuillaison, feuilles en majorité épanouies ; V4 : début de sénescence, feuilles jaunissantes ou sèches sur plus de 10 % et moins de 50 % des rameaux ; V5 : sénescence, feuilles sèches et chute des feuilles. Ces stades sont transformés en indice qualitatif de feuillaison : minimal (1), pour les stades V1 et V5 ; intermédiaire (2) pour les stades V2 et V4 ; maximal (3) pour le stade V3.

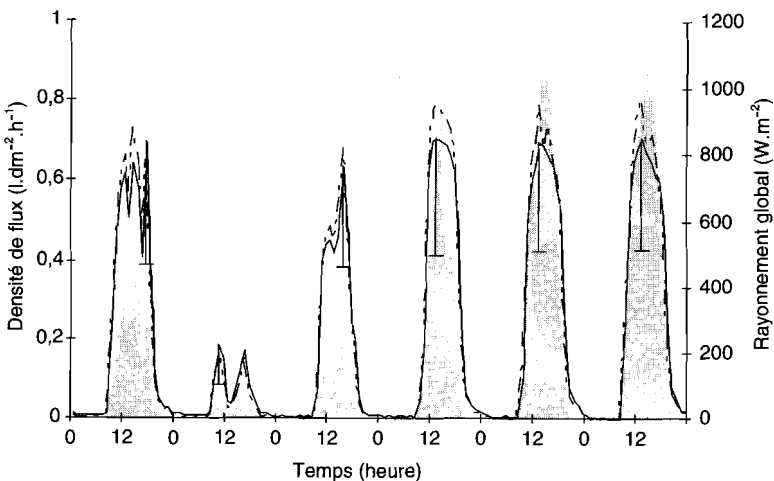
## ■ Résultats

### *Cinétique horaire des densités de flux*

La figure 2 montre un exemple de cinétique horaire des densités moyennes de flux dans les troncs et les pivots racinaires pour la période du 8 au 13 mars, durant laquelle le rayonnement global a varié fortement (de 500 à 7000  $\text{w.m}^{-2}.\text{j}^{-1}$ ), avec des traces de pluie le 9 mars. Dans cette période de transition entre la saison sèche

« fraîche » et la saison sèche « chaude », les valeurs maximales observées en milieu de journée se situent entre 0,6 et 0,8 l.dm<sup>-2</sup>.h<sup>-1</sup>. A l'échelle horaire, il apparaît une forte concordance entre le rayonnement global et les densités de flux, ce qui est attendu, le rayonnement solaire étant le moteur de l'ouverture stomatique et de l'ascension de la sève. Mais la concordance est moins nette à l'échelle journalière. On peut noter le synchronisme et l'équivalence des densités de flux dans le tronc et dans le pivot racinaire. Par rapport aux valeurs moyennes représentées, si les cinétiques de chaque capteur s'avèrent très synchronisées, les niveaux des maxima sont hétérogènes. La taille des écarts types de la figure 2 illustre ce point, les coefficients de variation évoluant entre 30 et 50 %, et la variabilité est aussi grande intra-arbre que inter-arbre. Ceci a deux conséquences : pour des arbres de ce diamètre, il est important d'implanter plusieurs capteurs par individu ; d'autre part, la précision relative de la moyenne obtenue est faible (environ 30 % dans ce cas).

L'intégration sur 24 h des densités de flux permet de calculer une densité cumulée et d'estimer la transpiration journalière par unité de surface conductrice de bois.



■ Figure 2  
Exemple de cinétique horaire de densité de flux de sève.  
Enregistrements effectués entre le 8 et le 13 mars 1996.  
(-) moyenne tronc (n = 9) et écart type des maxima ;  
(--) moyenne pivot racinaire (n = 6) ; | rayonnement global.



## Évolution décadaire de la densité de flux et de l'ETP

La demande évaporative exercée sur le peuplement végétal est analysée par l'évolution décadaire de l'ETP (fig. 3). Elle se situe entre 4 et 6 mm.j<sup>-1</sup> en saison sèche « fraîche », elle atteint ses maxima en saison sèche « chaude », 7 à 9 mm.j<sup>-1</sup>, et décroît avec la saison des pluies pour rejoindre des valeurs entre 5 et 7 mm.j<sup>-1</sup>.

Contrairement à l'échelle horaire, la densité de flux journalière dans le tronc présente, à l'échelle de la saison, une évolution opposée à celle de l'ETP : elle est maximale en saison sèche « fraîche » en janvier-février, entre 6 et 8 l.dm<sup>-2</sup>.j<sup>-1</sup>, quasi-nulle en mai au plus fort de la saison sèche « chaude », puis remonte ensuite lentement pour atteindre 4 à 5 l.dm<sup>-2</sup>.j<sup>-1</sup> en fin de saison des pluies. Comme à l'échelle horaire, ces valeurs moyennes sont associées à une forte variabilité (fig. 3). En correspondance avec l'ETP, la représentation des moyennes décadaires tend à lisser les évolutions.

Les densités de flux suivies dans le pivot racinaire sont systématiquement similaires à celles suivies dans le tronc. Les surfaces

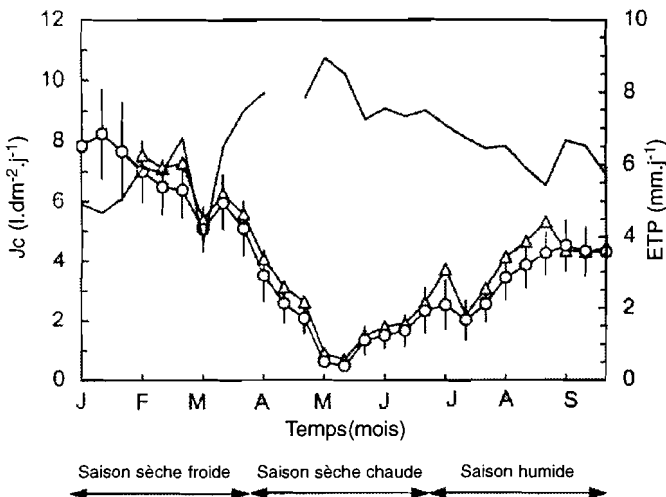


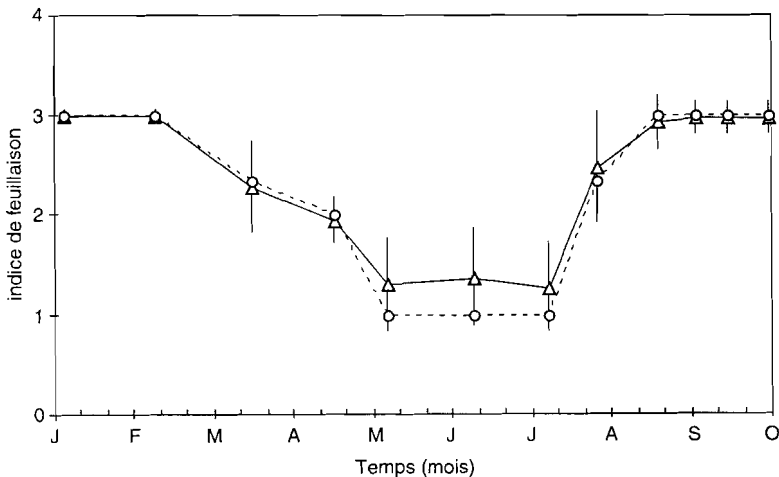
Figure 3  
Évolution saisonnière de la densité de flux de sève cumulée et de l'évapotranspiration potentielle. Mesures effectuées en 1996. (○) moyenne décadaire tronc (n = 9) et erreur type ; (△) moyenne décadaire pivot racinaire (n = 6) ; (-) ETP Penman décadaire.

conductrices étant équivalentes ( $1,8 \text{ dm}^2$ ), cette similitude signifie que le flux transpiratoire provient essentiellement du fonctionnement du pivot racinaire, même en saison des pluies. En conséquence, la contribution des horizons de profondeur à l'alimentation hydrique serait majeure, ceci sans pouvoir donner une définition précise des horizons colonisés par le pivot, car seul un trajet initial, vertical jusqu'à un mètre de profondeur, est observé.

La consommation maximale (en flux total), enregistrée en saison sèche fraîche, est de  $14 \text{ l.j}^{-1}$ , soit environ  $0,5 \text{ mm.j}^{-1}$  en se rapportant à la surface projetée de la couronne foliaire. Le cumul sur 9 mois, entre janvier et septembre, représente environ 1 900 litres d'eau.

### Phénologie foliaire

A l'échelle saisonnière, la phénologie foliaire détermine vraisemblablement les flux. La représentation schématique de trois niveaux de feuillaison à partir des stades phénologiques rend compte en partie de cette relation (fig. 4). En particulier, le niveau minimal de



■ Figure 4  
Évolution saisonnière de la densité de feuilles vertes ; indice de feuillaison entre un niveau minimal (1) et un niveau maximal (3) obtenu à partir des stades phénologiques (cf. méthodes). (Δ) moyenne du site ( $n = 40$ ) et écart-type ; (○) moyenne des arbres instrumentés ( $n = 3$ )

feuillaison dans les mois de mai et juin coïncide avec la période où les flux sont au plus bas. Les premières feuilles apparaissent avant la saison des pluies, l'essentiel du développement foliaire coïncide ensuite avec la saison des pluies, le niveau « maximal » se maintenant de septembre à janvier-février, soit durant 4 à 5 mois de saison sèche. Sur le site contrôlé de 1 ha, la situation est relativement homogène par rapport aux trois arbres instrumentés (fig. 4), mais il existe une hétérogénéité plus forte dans l'ensemble du paysage.

### Précipitations et ETR

En 1996, la saison des pluies a été déficitaire avec des pluies de faible intensité (maximum de  $26 \text{ mm.j}^{-1}$ ) et inégalement réparties, comportant 30 jours quasiment sans pluies en juillet (fig. 5). Le cumul de 150 mm est inférieur de 45 % à la moyenne annuelle. Le cumul des pluies en 1995 avait été plus favorable (250 mm).

Les ETR calculées à partir de la variation du stock hydrique du sol dans la tranche 0 - 4,00 m sont équivalentes sous-couvert et hors-couvert et ne rendent pas compte de la consommation en eau des arbres (fig. 5). En effet, les ETR calculées sont nulles de janvier à mai et suivent ensuite la distribution des pluies avec une valeur maximale de  $2,3 \text{ mm.j}^{-1}$  fin août. Ce constat amène deux hypothèses. La première est que le prélèvement hydrique des arbres concerne des horizons

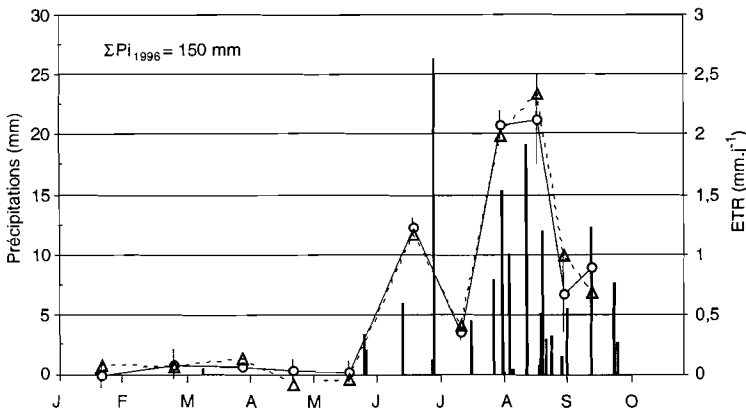
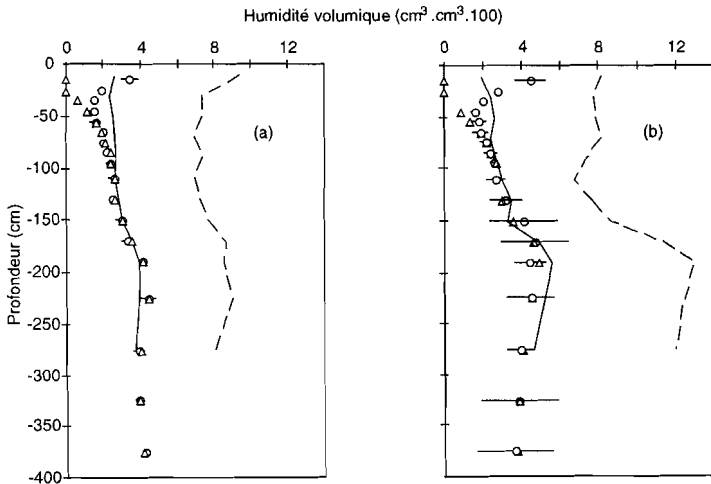


Figure 5  
Précipitations et évapotranspiration réelles sous-couvert et hors-couvert. | précipitations ; ( $\Delta$ ) moyenne ETR hors couvert (n = 3) ; ( $\circ$ ) moyenne ETR sous couvert (n = 3) et écart type

inférieurs à 4,0 m et que l'ETR estimée n'intègre que l'évaporation du sol et la transpiration des herbacées. La deuxième est que le volume exploré latéralement par l'intermédiaire du pivot (ex : entre 1,0 et 4,0 m de profondeur) est très important et que la variation d'humidité du sol est trop faible pour être perçue par la sonde à neutrons. En effet, une consommation moyenne de  $10 \text{ l.j}^{-1}$  affectée à une surface au sol ne serait-ce que deux fois supérieure à celle de la couronne projetée, induit une diminution mensuelle du stock de 5 mm, que la précision de la sonde ne permet pas d'appréhender sur une telle épaisseur de sol. Mais cette hypothèse est difficile à défendre sur une période de 5 mois car le cumul deviendrait décelable, à moins que la surface au sol à considérer soit encore beaucoup plus grande. Cette analyse doit aussi tenir compte de la disponibilité en eau sur le profil.

### Profils hydriques et disponibilités en eau

Les profils hydriques sous couvert et hors couvert sont similaires en terme de disponibilité en eau. La représentation des profils respectivement le plus sec et le plus humide montre que l'humectation n'excède pas 0,6 m de profondeur (fig. 6). Au delà, l'eau est très peu



■ Figure 6

Profils hydriques du sol sous-couvert (a) et hors-couvert (b).

( $\Delta$ ) 03/05/96 en saison sèche (n = 3); ( $\circ$ ) 14/08/96 en saison des pluies (n = 3) et écart type; (—) -1.6 Mpa; (---) capacité au champ

disponible avec des humidités proches de -1,6 MPa jusqu'à 4,0 m de profondeur. Ainsi, l'hypothèse de prélèvements hydriques à une profondeur supérieure à 4,0 m est renforcée.

## Discussion

### *Consommation en eau estimée par la mesure des flux de sève*

Les moyennes estimées sont à prendre comme des ordres de grandeurs, compte tenu de leur faible précision (45 %) liée à la variabilité des densités de flux intra et inter-arbre. La consommation journalière est relativement faible, et varie très fortement au cours de la saison, entre 1 et 14 l.j<sup>-1</sup>, soit au maximum 0,5 mm.j<sup>-1</sup>. Le cumul de janvier à septembre représente 63 mm, soit déjà 42 % des précipitations annuelles mais seulement 3,6 % de l'ETP.

Les valeurs maximales de densité de flux (1 l.dm<sup>-2</sup>.h<sup>-1</sup>) se situent dans la partie inférieure de la gamme (0.5 à 3 l.dm<sup>-2</sup>.h<sup>-1</sup>) observée dans la bibliographie (Loustau *et al.*, 1990; Cabibel et Do, 1991b; Rouspard *et al.*, 1996). Dans ces travaux, ces faibles valeurs sont observées en situation de contrainte hydrique. Nous pouvons donc inférer que les arbres étudiés dans le présent travail seraient sous contrainte toute la saison. L'idée est renforcée par la très faible disponibilité en eau. Les mesures de potentiel hydrique foliaire (débütées en parallèle en juillet 1996) confirment ce point, au moins pour la période de juillet à décembre, avec des potentiels de base entre -1,5 et -2,0 MPa. L'existence d'une variabilité des densités de flux intra-arbre avait déjà été notée (Cohen *et al.*, 1984; Granier, 1987; Do, 1987; Loustau *et al.*, 1990) mais avec une amplitude moins importante. Ce phénomène est attribué à une sectorisation plus ou moins marquée des flux au sein du xylème, résultant d'une continuité des vaisseaux entre certaines parties du système racinaire et certaines parties de la couronne foliaire. Dans notre étude, ce phénomène est vraisemblablement exacerbé par la faible intensité des flux, la géométrie très ouverte du couvert et les dissymétries au sein

de la couronne foliaire. Les valeurs affichées sont d'autant plus à prendre comme des ordres de grandeur que l'échantillonnage est limité (3 arbres à proximité, de diamètres proches) et que, dans le paysage, la densité foliaire des couronnes est hétérogène.

### *Déterminisme de la dynamique saisonnière et contribution du pivot racinaire*

La densité de flux présente une évolution saisonnière opposée à celle de l'ETP, elle suit peu la disponibilité en eau de surface induite par les pluies, et elle apparaît surtout liée à la phénologie foliaire. La contribution majeure du pivot racinaire au flux transpiratoire et la très faible disponibilité en eau laissent supposer que des prélèvements hydriques profonds, à plus de 4 m, dominent durant toute la saison. D'un point de vue méthodologique, la discordance des résultats sur la consommation en eau des arbres, observée entre la mesure des flux de sève et la méthode neutronique, remet en cause la seule utilisation de cette dernière dans ces études en savane sèche. Les informations fournies par la mesure des flux de sève constituent, en terme d'ordre de grandeur et de dynamique, un progrès très important.

Le spectre phénologique décrit rejoint les observations de Fournier (1995) et Diouf (1996) et la quantification en parallèle des flux a permis d'en souligner la prééminence vraisemblable dans la hiérarchie des facteurs d'adaptation. L'importance de la phénologie foliaire paraît évidente. Elle détermine l'évolution de la surface foliaire qui définit la capacité structurelle de transpiration et peut ainsi induire une consommation très différente de la demande évaporative qui représente en quelque sorte le moteur de la « pompe » mais pas sa dimension. Mais il reste à quantifier réellement cette évolution, ce qui représente un chantier conséquent et délicat. D'autre part, la phénologie racinaire n'a pas été abordée, elle est vraisemblablement couplée dans le temps avec la phénologie foliaire et constitue certainement un élément important des modalités d'utilisation de l'eau.

La perspective d'une exploration racinaire conséquente au delà de 4,0 m de profondeur est tout à fait plausible pour des individus adultes. Lhote (1961) rappelle que, lors du creusement des puits

encadrant le célèbre *Acacia tortilis* isolé au milieu du Ténééré, des racines ont été trouvées jusqu'à 30 m de profondeur, la nappe se situant à 35 m. Sur une espèce proche, *Acacia seyal*, Soumaré *et al.* (1994) trouvent au Mali que la longueur maximale des racines traçantes peut atteindre 26 m. D'autre part, les profils décrits par les hydro-géologues dans le Ferlo font état d'accroissements de l'humidité du sol avant la nappe et liés à la circulation de l'eau selon le modèle du piston (Gaye et Edmunds, 1996), mais la disponibilité de cette eau reste à préciser.

## Conclusion

L'apport principal de ce travail tient dans une première quantification des densités de flux de sève et de la consommation d'eau d'*Acacia tortilis*, en continu sur un cycle saisonnier, et dans des conditions naturelles bien caractérisées. Les résultats soulignent la remarquable capacité d'adaptation d'*Acacia tortilis*, qui survit malgré la forte demande évaporative, des précipitations limitées à 150 mm et un sol asséché jusqu'à au moins 4 m de profondeur. Son fonctionnement permet une production de feuillage et de gousses, précieuse pour l'alimentation du bétail en saison sèche, et laisse supposer une faible compétition avec la strate herbacée en saison des pluies.

Trois éléments fondamentaux d'adaptation sont à retenir : des prélèvements hydriques profonds, une consommation en eau particulièrement faible et une certaine optimisation du rapport assimilation photosynthétique/transpiration, puisque les échanges gazeux foliaires les plus importants se réalisent dans les saisons où les pertes potentielles en eau sont les plus faibles. Mais cette adaptation à la contrainte hydrique a des limites, en terme de croissance et de production, qu'il faudrait préciser. L'approfondissement du diagnostic nécessite alors de coupler l'étude du fonctionnement hydrique avec une approche également quantitative de la phénologie et de la croissance de l'arbre. D'autre part, les observations faites correspondent à une année déficitaire : qu'en est-il en situation plus favorable ? Enfin, l'application de ces résultats à la gestion du parc agroforestier

en zone pastorale comme en zone cultivée, où la question de la densité optimale de ligneux est systématiquement soulevée, demande de développer une connaissance plus prédictive qui, on le voit bien, passe par l'évaluation des surfaces d'échange, foliaire et racinaire.

### Remerciements

Cette étude a pu être réalisée grâce à l'équipe technique du Laboratoire (M<sup>e</sup> Baye Youm, Yacinthe Tendeng, Baïdi Ly), au support financier de l'UR34 de l'ORSTOM (responsable : R. Pontanier) et du programme SDT III de l'Union Européenne (contrat TS3 CT92 0047). Enfin, nous remercions les centres INRA de Nancy (A. Granier) et Avignon (B. Cabibel, R. Huc) pour leur collaboration qui a permis en particulier de fabriquer des fluxmètres à Dakar.

## Bibliographie

- AKPO (L. E.), 1993 - Influence du couvert ligneux sur la structure et le fonctionnement de la strate herbacée en milieu sahélien. Orstom, Paris, TDM n° 93, 175 p.
- BERGER (A.), GROUZIS (M.), FOURNIER (C.), 1996 - The water status of six woody species coexisting in the Sahel (Ferlo, Senegal). *J. Trop. Ecol.*, 12 : 607-627.
- CABIBEL (B.), DO (F.), 1991a - 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. *Agron*, 11 : 669-678.
- CABIBEL (B.), DO (F.), 1991b - Mesures thermiques des flux de sève et comportement hydrique des arbres. Évolution dans le temps des flux de sève et comportement hydrique des arbres en présence ou non d'une irrigation localisée. *Agron*, 11 : 757-766.
- CHOISNEL (E.), DE VILLÈLE (O.), LACROZE (F.), 1992 - Une approche uniformisée du calcul de l'évapotranspiration potentielle pour l'ensemble des pays de la communauté européenne. Publié par la Commission des Communautés Européennes, Luxembourg, 170 p.
- COHEN (Y.), KELLIHER (F. M.), BLACK (T. A.), 1984 - Determination of sap flow in Douglas fir trees using the heat pulse technique. *Can. J. For. Res.*, 15 : 422-428.
- DIOUF (M.), 1996 - Étude du fonctionnement hydrique et des réponses à l'aridité des ligneux sahéliens. Cas de *Acacia*



- tortilis* (Forsk.) Hayne *subsp. raddiana* (Savi) Brenan en zone soudano-sahélienne de Sénégal. Thèse de Doctorat de 3<sup>ème</sup> cycle, UCAD, Dakar, 165 p.
- DO (F.), 1987 -  
Caractérisation spatiale de l'extraction racinaire par la mesure des flux de sève. Mémoire de DEA, ENSA-USTL Montpellier, 41 p.
- FAGG (C. W.), GREAVES (A.), 1990 -  
*Acacia tortilis* : 1925-1988. Annotated Bibliography n°F41, K Langdon Ed., CAB International, Oxford, 36 p.
- FOURNIER (CH.), 1995 -  
Fonctionnement hydrique de six espèces ligneuses coexistant dans une savane sahéenne (Région du ferlo, Nord-Sénégal). Orstom, Paris, TDM n° 132, 165 p.
- GAYE (C. B.),  
EDMUNDS (W. M.), 1996 -  
Groundwater recharge estimation using chloride, stable isotopes and tritium profiles in the sands of northwestern Senegal. *Environ. Geol.*, 27 : 246-251.
- GRANIER (A.), 1985 -  
Une nouvelle méthode pour la mesure des flux de sève dans le tronc des arbres. *Ann. Sci. For.*, 42 : 193-200.
- GRANIER (A.), 1987 -  
Mesure du flux de sève brute dans le tronc du Douglas par une nouvelle méthode thermique. *Ann. Sci. For.*, 44 : 1-14.
- GROUZIS (M.), SICOT (M.), 1980 -  
A method for the phenological study of browse population in the Sahel : the influence of some ecological factors. In *Browse in Africa, the current state of knowledge*, HN Le Houerou Ed., ILCA, International Symposium on Browse in Africa, Addis Ababa, 8-12 avril 1980, 233-240.
- GUTTIÉRREZ (M. V.),  
HARRINGTON (R. A.), MEINZER (F. C.),  
FOWNES (J. H.), 1994 -  
The effect of environmentally induced stem temperature gradients on transpiration estimates from the heat balance method in two tropical woody species. *Tree Physiol.*, 14 : 179-190.
- LHOTE (H.), 1961 -  
Au sujet de l'arbre du Ténééré. Bulletin de liaison saharienne 12 : 49-54.
- LOUSTAU (D.), GRANIER (A.),  
EL HADJ MOUSSA (F.), 1990 -  
Évolution saisonnière du flux de sève dans un peuplement de pins maritimes. *Ann. Sci. For.*, 21 : 599-618.
- MAIGNIEN (R.), 1965 -  
Carte pédologique du Sénégal au 1/1 000 000. ORSTOM, centre de Dakar-Hann.
- NIZINSKI (J.), MORAND (D.),  
FOURNIER (CH.), 1994 -  
Actual evapotranspiration of a thorn scrub with *Acacia tortilis* and *Balanites aegyptiaca* (North Senegal). *Agric. For. Meteorol.*, 72 : 93-111.
- POUPON (H.), 1980 -  
Structure et dynamique de la strate ligneuse d'une steppe sahéenne du Nord-Sénégal. Trav. Orstom, Paris, Doc. n° 115, 351 p.
- RIOU (C.), 1975 -  
La détermination pratique de l'évaporation : application à l'Afrique Centrale. Orstom, Paris, Mémoires Orstom n° 80, 236 p.
- ROUPSARD (O.), JOLY (H.),  
DREYER (E.), 1996 -  
Ecophysiologie de *Faidherbia albida* : Fonctionnement hydrique en parc agroforestier et variabilité intraspécifique de caractéristiques juvéniles. In *Les parcs à Faidherbia*, CIRAD., Nogent-sur-Marne, 85-102.

SANCHEZ (P. A.), 1995 -  
Science in agroforestry.  
*Agrofor. Syst.*, 30 : 5-55.

SOMARÉ (A.), GROOT (J. J.R.),  
KONÉ (D.), RADERSMA (S.), 1994 -  
Structure spatiale du système  
racinaire de deux arbres du Sahel :  
*Acacia seyal* et *Sclerocarya birrea*.  
Projet « Production Soudano-  
Sahélienne », rapport PSS n° 5,  
Wageningen, 37 p.

ULLMAN (I.), 1989 -  
Stomatal conductance and  
transpiration of *Acacia* under field  
conditions : similarities and

differences between leaves and  
phyllodes. *Trees*, 3 : 45-56.

VALANCOGNE (C.),  
GRANIER (A.), 1993 -  
Intérêt des méthodes thermiques  
de mesure des flux de sève pour  
l'étude du bilan hydrique des  
savanes. In Soil water balance in the  
Sudano-Sahelian Zone, Proceedings  
of the Niamey Workshop, February.,  
1991. IAHS Publ. n° 199 : 387-400.

WHITE (F.), 1983 -  
The vegetation of Africa. Natural  
Resources Research n° 20,  
UNESCO, 356 p.