

## Le rôle du couvert ligneux sur le bilan hydrique d'une steppe (nord du Sénégal)

Jerzy NIZINSKI(1), Dominique MORAND(2), Christophe FOURNIER(2)

(1) Inra, Laboratoire de bioclimatologie, 71, av. Édouard-Bourleaux B.P. 81, 33 883 Villeneuve d'Ornon cedex  
Laboratoire d'écologie végétale, Orstom, B.P. 1386, Dakar-Sénégal

### RÉSUMÉ

L'évapotranspiration de deux bosquets de ligneux (*Acacia tortilis* et *Balanites aegyptiaca* possédant leur strate herbacée) et d'une zone herbacée hors couvert de la steppe sahélienne (Ferlo sénégalais) a été étudiée de 1989 à 1992. L'évapotranspiration a été estimée à partir de l'équation du bilan (mesures à la sonde à neutrons).

La steppe a évapotranspiré en moyenne 1,92 mm.j<sup>-1</sup> en saison des pluies (période n° 1), 1,62 mm.j<sup>-1</sup> en saison dite « différée » (période n° 2), 0,62 mm.j<sup>-1</sup> en saison sèche fraîche (période n° 3) et 0,09 mm.j<sup>-1</sup> en saison sèche chaude (période n° 4). L'ETR maximale journalière des deux bosquets de ligneux est supérieure à celle de la zone herbacée toute l'année, l'ETR du bosquet d'*Acacia tortilis* étant supérieure à celle du bosquet de *Balanites aegyptiaca*, soit respectivement pour *Acacia tortilis*, *Balanites aegyptiaca* et la zone herbacée : 5,04-4,15 et 3,98 mm.j<sup>-1</sup> (période n° 1), 4,28-3,76 et 2,89 mm.j<sup>-1</sup> (période n° 2), 1,73-1,79 et 1,34 mm.j<sup>-1</sup> (période n° 3), 0,93-0,46 et 0,36 mm.j<sup>-1</sup> (période n° 4). En fin de saison sèche, après un cycle de végétation, il subsiste dans le sol de la zone herbacée un stock d'eau de 20 mm : cette steppe aurait pu produire 13,7 à 20,8 kg MS ha<sup>-1</sup>.année<sup>-1</sup> de bois en plus.

MOTS CLÉS : Bilan hydrique – *Acacia tortilis* – *Balanites aegyptiaca* – Déboisement – Steppe – Ferlo.

### ABSTRACT

#### IMPACT OF LAND CLEARANCE ON THE THORN SCRUB WATER BALANCE (NORTH SENEGAL)

The actual evapotranspiration ( $E_a$ ) was followed from 1989 to 1992 in a thorn scrub stand in the northern Ferlo region (North Senegal, West Africa) for an *Acacia tortilis* grove, a *Balanites aegyptiaca* grove (every grove possessed its characteristic herbaceous layer) and a herbaceous zone outside the tree crown shade (annuals).  $E_a$  was derived from the water balance equation method (neutron probe measurements).

The mean seasonal actual evapotranspiration of the thorn scrub was 1.90 mm.day<sup>-1</sup> during the rainy season (period 1), 1.62 mm.day<sup>-1</sup> during the «deferred» season (period 2), 0.62 mm.day<sup>-1</sup> during the cool dry season (period 3) and 0.09 mm.day<sup>-1</sup> during the hot dry season (period 4). The daily maximal actual evapotranspiration was higher than that of the herbaceous zone and the *Acacia tortilis* grove's maximal daily actual evapotranspiration was higher than that of the *Balanites aegyptiaca* grove: 5.04-4.15 and 3.98 mm.day<sup>-1</sup> (period 1), 4.28-3.76 and 2.89 mm.day<sup>-1</sup> (period 2), 1.73-1.79 and 1.34 mm.day<sup>-1</sup> (period 3), 0.93-0.46 and 0.36 mm.day<sup>-1</sup> (period 4) for the *Acacia tortilis* and *Balanites aegyptiaca* groves and the herbaceous zone respectively.

By the end of the growing year, soil moisture differed by 20.8 mm between tree and grassland zones in favor of grassland. Had this water been used by trees, this thorn scrub could have produced 13.7 to 20.8 kg DM ha<sup>-1</sup>.year<sup>-1</sup> more wood.

KEY WORDS: Soil-water balance – *Acacia tortilis* – *Balanites aegyptiaca* – Woodcutting – Thorn scrub – Ferlo.

## INTRODUCTION

La steppe sahélienne est composée d'une strate herbacée plus ou moins continue et d'une strate arbustive-arborescente discontinue (d'un recouvrement de 30 à 80 % d'après COLE, 1986). Cette steppe est formée d'ensembles dunaires dans lesquels on peut isoler quatre grandes unités topographiques, hauts de dunes, pentes, bas de pentes, replats, avec pour chacune de ces unités une végétation éparsée. Les études d'évapotranspiration réelle des végétations éparsées doivent tenir compte : 1° – de la structure de la végétation : zones de sol nu, zones herbacées, bosquets d'arbres ; 2° – du fait que la contribution de ces unités à l'évapotranspiration réelle totale varie au cours de la journée et au cours des saisons (MASSMAN, 1992).

Cet article se propose de présenter : 1° – l'évapotranspiration réelle d'une fraction de la steppe sahélienne, l'évapotranspiration étant estimée à partir de l'équation du bilan hydrique (mesures à la sonde à neutrons) ; 2° – la contribution de la strate ligneuse à l'évapotranspiration réelle de la steppe et l'incidence de modifications du couvert ligneux sur le bilan hydrique.

On a choisi une zone de pente, l'unité la plus représentée en surface (40 % de la surface, d'après CORNET, 1981) ; cette zone de pente comprend des surfaces strictement herbacées, des surfaces herbacées avec des arbres ou arbustes isolés et des bosquets d'arbres et arbustes.

## MATÉRIEL ET MÉTHODES

### Station d'études

La zone d'étude se situe dans la partie nord du Sénégal (Ferlo sénégalais), elle est soumise à un climat tropical sec de type sahélien avec des précipitations moyennes annuelles de 282,4 mm.an<sup>-1</sup> (de 1918 à 1990, station de référence Dagana).

La saison des pluies s'étale sur environ 80 jours de juillet à septembre, la température moyenne de l'air est de 28,7 °C, l'évapotranspiration potentielle est de 2 031 mm.an<sup>-1</sup> (Anonyme, 1988).

D'après LE HOUEROU (1989), le Ferlo sénégalais appartient à la zone écoclimatique sahélienne *stricto sensu* : il s'agit d'une steppe très ouverte à épineux (*Mimosaceae*) : une strate herbacée composée d'annuelles (avec dominance de graminées) parsemée d'arbres et d'arbustes (POUPON, 1980). Le paysage se caractérise par des formations

dunaires de faible amplitude, non orientées, délimitant de petites dépressions fermées.

Le site expérimental, d'une surface de 1 ha, est situé à 400 km de Dakar, à 20 km de Dagana et à proximité du lieu-dit Souilène (16°20'39"N et 15°25'40"W). Le site englobe le haut d'une dune jusqu'au bas de pente, la ligne de plus grande pente du site est de 1,6 %.

La strate arborescente est composée d'*Acacia tortilis* (Forsk.) Hayne ssp. *raddiana* (Savi) Brenand et de *Balanites aegyptiaca* (L.) Del ; la densité à l'hectare est de 151 individus (surface terrière de 3,87 m<sup>2</sup>.ha<sup>-1</sup>). Sur le site de 1 ha, on a choisi un bosquet d'*Acacia tortilis*, un bosquet de *Balanites aegyptiaca* et une surface herbacée hors couvert (ou sans arbres). Les arbres du bosquet d'*Acacia tortilis* et de *Balanites aegyptiaca* ont une hauteur moyenne de respectivement 6,60 m et 6,40 m et une circonférence moyenne du tronc au sol de respectivement 0,56 m et 0,61 m. L'âge de ces individus correspond à l'âge le plus représenté dans la pyramide des âges des peuplements des deux espèces, vingt ans pour *Acacia tortilis* (MARIAUX, 1975) et vingt cinq ans pour *Balanites aegyptiaca* (POUPON, 1980). Chaque bosquet possède sa propre strate herbacée (annuelle).

Le sol appartient au groupe des sols subarides tropicaux : il s'agit d'un sol brun-rouge formé sur matériau sableux pauvre en argile.

La zone d'étude est une zone de pâturage, l'effectif du cheptel du département de Dagana est de 35 791 UBT (Unité Bétail Tropical), la production de matière sèche moyenne annuelle de la strate herbacée (2 895 kg MS ha<sup>-1</sup>.année<sup>-1</sup>) est inférieure de 10 % à la demande optimale du cheptel présent (AKPO, 1992). La présence permanente du bétail, par son piétinement, maintient un état de surface qui favorise l'infiltration de la pluie (LAMACHERE, 1991). La mise en défens (suppression du piétinement) provoque la constitution d'une croûte qui entrave la germination des espèces de la strate herbacée (CORNET, 1981).

Le site expérimental a été mis en défens en mai 1989 ; à la fin de la saison des pluies 1989, un encroûtement était déjà visible, ce qui nous a amenés à sarcler le sol avant la saison des pluies 1990 et 1991.

### Équation du bilan hydrique

L'expression du bilan hydrique du sol, en l'absence de ruissellement et de nappe phréatique, peut s'écrire sous la forme suivante :

$$P_i = ETR + D + dR/dt \text{ (mm.j}^{-1}\text{)} \quad (1)$$

$$\text{où } ETR = T + I_n + E_s \text{ (mm.j}^{-1}\text{)} \quad (2)$$

$$\text{et } I_n = P_i - (P_s + E_c) \text{ (mm.j}^{-1}\text{)} \quad (3)$$

avec :  $P_i$  – précipitations incidentes, en  $\text{mm.j}^{-1}$  ;  $ETR$  – évapotranspiration réelle du peuplement, en  $\text{mm.j}^{-1}$  ;  $D$  – drainage, en  $\text{mm.j}^{-1}$  ;  $dR$  – variation de la réserve en eau du sol, en  $\text{mm}$  ;  $dt$  – pas de temps des calculs, en jours ;  $T$  – transpiration, en  $\text{mm.j}^{-1}$  ;  $I_n$  – interception nette, en  $\text{mm.j}^{-1}$  ;  $E_s$  – évaporation du sol, en  $\text{mm.j}^{-1}$  ;  $P_s$  – précipitations au sol, en  $\text{mm.j}^{-1}$  ;  $E_c$  – écoulement le long des troncs, en  $\text{mm.j}^{-1}$ .

Nous mesurons directement la réserve en eau du sol, les précipitations au-dessus du peuplement, les précipitations au sol et l'écoulement le long des troncs ; les valeurs du drainage, de l'interception nette et de la transpiration sont calculées en supposant  $ETR=ETP$  (évapotranspiration potentielle) en période humide (réserve à la capacité au champ,  $R_{CC}$ ) et en supposant un drainage nul en période sèche (réserve inférieure à la capacité au champ) ; ceci permet de calculer le drainage et l'ETR :

$$\text{Si } R > R_{CC} \text{ alors } ETR=ETP$$

$$\text{et } D=P_i-ETP-dR/dt \text{ (mm.j}^{-1}\text{)} \quad (4)$$

$$\text{Si } R < R_{CC} \text{ alors } D=0$$

$$\text{et } ETR=P_i-dR/dt \text{ (mm.j}^{-1}\text{)} \quad (5)$$

La texture sableuse du sol permet de faire l'hypothèse d'un drainage nul lorsque  $R < R_{CC}$ , cette texture impliquant une chute très rapide de la conductivité hydrique avec le dessèchement du sol (MARSHALL et HOLMES, 1988).

La profondeur de sol prise en compte dans les calculs a été fixée à 4,75 mètres.

### Dispositif expérimental des mesures du bilan d'eau *in situ*

#### STOCK D'EAU DU SOL (R)

Nous avons utilisé une sonde à neutrons de type « Solo » mise au point au Centre d'Études nucléaires de Cadarache, et nous avons étalonné la sonde par la méthode gravimétrique. Le dispositif expérimental est constitué de quinze tubes d'accès à la sonde à neutrons (fig. 1) en duralumin (D 41-45 mm) : trois tubes pour le bosquet à *Acacia tortilis* (tubes 1, 2 et 3), trois tubes pour le bosquet *Balanites aegyptiaca* (tubes 4, 5 et 6), cinq tubes pour la surface herbacée (tubes 7, 8, 9, 12 et 13) et quatre tubes en zones de lisière (tubes 10, 11, 14 et 15) ; les tubes sont situés sur des courbes de niveau très proches. Les mesures sont effectuées tous les 0,10 m jusqu'à un mètre de profondeur, puis tous

les 0,20 m jusqu'à deux mètres et tous les 0,50 m jusqu'à cinq mètres de profondeur. La somme des stocks d'eau de tous les niveaux d'un tube constitue la rétention en eau du profil de ce tube.

Les valeurs de la capacité au champ ( $R_{CC}$ ) et du point de flétrissement permanent ( $R_{PFP}$ ) ont été déterminées *in situ*. Six tubes (humidité volumique) sont associés à des batteries de psychromètres (potentiel hydrique) installés tous les 0,10 m, de la surface jusqu'à 4,00 m de profondeur, sur une surface circulaire de 1,00 m de diamètre, correspondant à un dispositif de type Muntz (MARSHALL et HOLMES, 1988) : il s'agit d'un infiltromètre avec un anneau extérieur de 1,00 m de diamètre et d'une hauteur de 0,20 m enfoncé dans le sol sur une profondeur de 0,10 m, permettant l'infiltration d'une lame d'eau sous charge constante et la réhumectation homogène du profil sur une profondeur donnée. En saison sèche, le sol a été artificiellement amené à des humidités proches de la capacité au champ, puis s'est progressivement desséché jusqu'au point de flétrissement permanent.  $R_{CC}$  correspond à un potentiel hydrique du sol de  $-0,01$  MPa et  $R_{PFP}$  de  $-1,6$  MPa.

Nous avons obtenu la réserve utile (RU) à partir de la différence entre  $R_{CC}$  et  $R_{PFP}$  ; la somme des RU de tous les niveaux d'un tube rend compte de la RU du profil de ce tube.

Le stock d'eau du profil de chaque bosquet, de la surface herbacée et de la steppe est calculé en faisant la moyenne arithmétique des stocks d'eau des profils de chacun des tubes qui leur sont associés (même chose pour la RU).

#### PRÉCIPITATIONS INCIDENTES ( $P_i$ )

Les relevés de  $P_i$  proviennent de la station météorologique installée sur la station d'étude (pluviomètre de type ARG100 de Campbell ; surface de réception de  $510,7 \text{ cm}^2$ ).

#### PRÉCIPITATIONS AU SOL ( $P_s$ )

Les précipitations au sol ont été recueillies à l'aide de 17 pluviomètres de type « Bendix » (fig. 1), d'une hauteur de 0,90 m, d'un diamètre de 0,203 m : cinq pluviomètres pour le bosquet à *Acacia tortilis*, cinq pluviomètres pour le bosquet à *Balanites aegyptiaca*, quatre pluviomètres en zone de lisière et trois pluviomètres hors couvert. Les précipitations au sol caractéristiques de chaque bosquet, de la surface herbacée et de la steppe sont

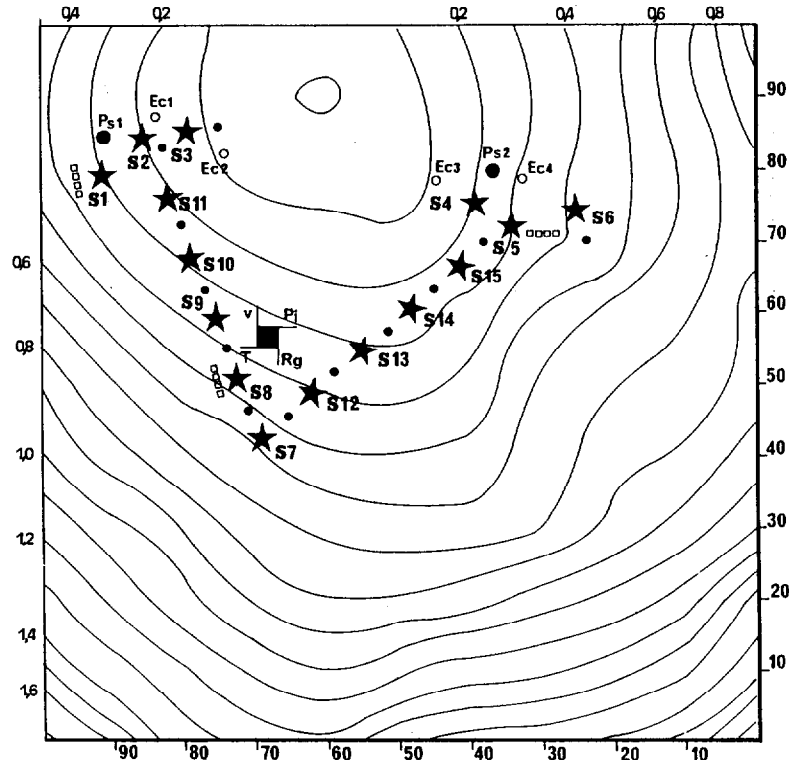


FIG. 1 – Plan de la station d'étude (surface : 10 000 m<sup>2</sup>, pente : 1,6 %, altitude : 5 m IGN) ; ■ : station météorologique (précipitations incidentes, température moyenne de l'air, température de rosée, températures du sol (0,5-1,0 et 1,5 m), rayonnement global, rayonnement net, humidité de l'air, vitesse du vent) ; ★ : tube d'accès pour la sonde à neutrons ; ● : pluviomètre ; ○ : gouttière ; □□□ : sonde psychrométrique.

Map of study plot (area : 10 000 m<sup>2</sup>, slope : 1.6 %, elevation : 5 m above sea level) ; ■ : meteorological station (rainfall, mean air temperature, dew point temperature, soil temperatures (at 0.5-1.0 and 1.5 m depth), air humidity, solar radiation, net radiation, wind speed) ; ★ : neutron probe access tube ; ● : raingauge ; ○ : stemflow collar ; □□□ psychrometer thermocouple.

calculées en faisant la moyenne arithmétique des hauteurs d'eau des pluviomètres correspondants.

### Écoulement le long des troncs (Ec)

Nous avons entouré le tronc d'un individu d'*Acacia tortilis* d'une gouttière en matière plastique étanche en forme d'hélice débutant à 1,30 m du sol et s'en arrêtant à 0,50 m, hauteur à laquelle le volume d'eau qui s'écoule est recueilli. Ce volume est rapporté à la surface de la projection verticale de la couronne de cet arbre (25,63 m<sup>2</sup>) et rend compte de Ec, exprimé en hauteur d'eau.

### Évapotranspiration potentielle (ETP)

L'évapotranspiration potentielle est calculée à partir de la formule de PENMAM (1948) modifiée par VAN BAVEL (1966) :

$$ETP = (D.Rn = qc_p.de/r_a)/L.(D + c) \text{ (mm.j}^{-1}\text{)} \quad (7)$$

avec : D – dérivée de la fonction reliant la pression de vapeur d'eau saturante de l'air et la température de l'air ; Rn – rayonnement net, en W.m<sup>-2</sup> ; qc<sub>p</sub> – capacité calorifique de l'air à pression constante, en J.m<sup>-2</sup>.°C<sup>-1</sup> ; de – déficit de saturation de l'air en vapeur d'eau, en mb ; c – constante psychrométrique, en mb. °C<sup>-1</sup> ; L – chaleur latente de vaporisation de l'eau, en J.kg<sup>-1</sup> (2,46 10<sup>6</sup>) ; la résistance aérodynamique, r<sub>a</sub> (s.m<sup>-1</sup>), a été estimée à l'aide de l'équation proposée par MONTEITH (1965) :  $r_a = (1/(k^2u))(\ln(z-d)/z_0)^2$  avec k – constante de von Karman (0,39) ; u – vitesse moyenne du vent à 2 m de la surface du sol (m.s<sup>-1</sup>) ; z – niveau considéré (m) ; z<sub>0</sub> – longueur de rugosité (m) et d – hauteur du déplacement (m). Les paramètres d et z<sub>0</sub> ont été obtenus à partir des formules proposées par THOM (1971) : d=0,75 h et z<sub>0</sub>=0,1h où h – hauteur du peuplement (m).

#### ACQUISITION DES DONNÉES

Les mesures des éléments du bilan hydrique ont débuté le 22 juillet 1989 : le stock d'eau du sol, les précipitations incidentes, au sol, l'écoulement le long des troncs ont été mesurés tous les mois en saison sèche et tous les quinze jours en saison des pluies ; les variables nécessaires à l'estimation de l'évapotranspiration potentielle (température moyenne de l'air, température de rosée, rayonnement net, pression atmosphérique, vitesse du vent) sont mesurées toutes les heures ; ces données sont stockées en continu sur une centrale d'acquisition de données de type Micrologger 21X.

#### RÉSULTATS ET DISCUSSION

Nos résultats concernent la période allant du 9 août 1989 au 2 juillet 1992 ; on reprendra la classification de LE HOUEROU (1989) qui décompose l'année en fonction de la pluviométrie en : période n° 1, de mi-juin à mi-septembre (saison des pluies) ; période n° 2, de septembre à novembre (saison dite « différée », arrêt des pluies, herbacées encore vivantes) ; période n° 3, de novembre à février (saison sèche fraîche) ; période n° 4, de mars à mai (saison sèche chaude). Les précipitations incidentes annuelles et l'ETP annuelle ont été respectivement pour 1989 de 226,5 mm et de 2 233,2 mm ; pour 1990 de 172,0 mm et de 2 352,4 mm ; pour 1991 de 148,3 mm et de 2 183,0 mm, ces trois années sont donc déficitaires. *Acacia tortilis* et *Balanites aegyptiaca* ont des feuilles toute l'année (avec des variations d'indice foliaire (FOURNIER, 1993)), donc absorbent/transpirent toute l'année. Les herbacées hors couvert et sous couvert (bosquet d'*Acacia tortilis* et de *Balanites aegyptiaca*) sont des annuelles qui absorbent/transpirent pendant la saison des pluies et la saison « différée » (périodes n° 1 et n° 2).

#### Évapotranspiration réelle

Nous discuterons de l'ETR issue de l'équation (5) pour des périodes à drainage nul qui représentent la quasi-totalité des situations. En 1989, 1990, 1991, lors de la saison des pluies (période n° 1), qui a duré en moyenne 86 jours (respectivement 90, 79, 90 jours), la steppe a évapotranspiré en moyenne 165,1 mm d'eau (120,08 et 203,31 mm pour les deux années les plus contrastées), soit une moyenne journalière de 1,92 mm.j<sup>-1</sup>. Lors des

périodes n° 2, n° 3 et n° 4, la steppe a évapotranspiré en moyenne 1,62-0,62 et 0,09 mm d'eau. Ces chiffres sont comparables à ceux de CORNET (1981), qui a utilisé la même approche pour une steppe semblable, dans la même région (Fété Olé, 15°06'W, 16°14'N), pour une zone de pente de dune semblable à notre site expérimental (calculs faits pour 3,0 mètres de profondeur), pour deux années comparables aux nôtres, 1975 (Pi=311,2 mm) et 1977 (Pi=130,3 mm) lors de la période de juillet à novembre (périodes n° 1 et n° 2) : il obtient une ETR saisonnière de 206,4 mm et 126,2 mm soit 1,4-1,88 et 1,09-1,25 mm.j<sup>-1</sup>. Nous avons choisi la période de la mi-juin 1990 à la mi-juin 1991 pour illustrer les ETR journalières maximales des deux bosquets, de la zone herbacée et de la steppe lors des quatre saisons. Les 4,75 m de sol seront divisés en deux profondeurs remarquables : de 0 à 1,0 m et de 1,0 à 4,75 m, et ceci, d'après l'évolution des profils hydriques (humidité volumique et potentiel hydrique en fonction de la profondeur) pendant les trois années d'étude (NIZINSKI *et al.*, 1994) : la quasi-totalité des racines des herbacées hors couvert et des herbacées sous couvert (en mélange avec les racines d'arbres) se concentre de 0 à 1,0 m, la profondeur 1,0-4,75 m étant exploitée par les arbres.

De 0 à 4,75 m : de la période n° 1 à la période n° 4, pour l'ensemble du profil, toutes les ETR journalières maximales décroissent, en accord avec le régime pluviométrique (fig. 2a). Pour l'ensemble du profil et sur l'ensemble de l'année, les bosquets ont une ETR journalière maximale supérieure à celle de la zone herbacée et le bosquet à *Acacia tortilis* a une ETR journalière maximale supérieure à celle du bosquet à *Balanites aegyptiaca* : respectivement pour les bosquets à *Acacia tortilis*, à *Balanites aegyptiaca* et pour les zones herbacées, 5,04-4,15-3,98 mm.j<sup>-1</sup> (période n° 1), 4,28-3,76-2,89 mm.j<sup>-1</sup> (période n° 2), 1,73-1,79-1,34 mm.j<sup>-1</sup> (période n° 3), 0,93-0,46-0,36 mm.j<sup>-1</sup> (période n° 4) (fig. 2a). En saison des pluies (période n° 1, pas de contrainte hydrique, rétention en eau du sol supérieure ou égale à 60 % R<sub>cc</sub>), les bosquets et la zone herbacée utilisent préférentiellement l'eau du haut du profil de 0 à 1,0 m plutôt que l'eau plus profonde de 1,00 à 4,75 m alors que l'eau n'est pas limitante dans le bas du profil : d'après la figure 2b, le bosquet à *Acacia tortilis* consomme environ deux fois plus d'eau dans le haut du profil que dans le bas et le bosquet à

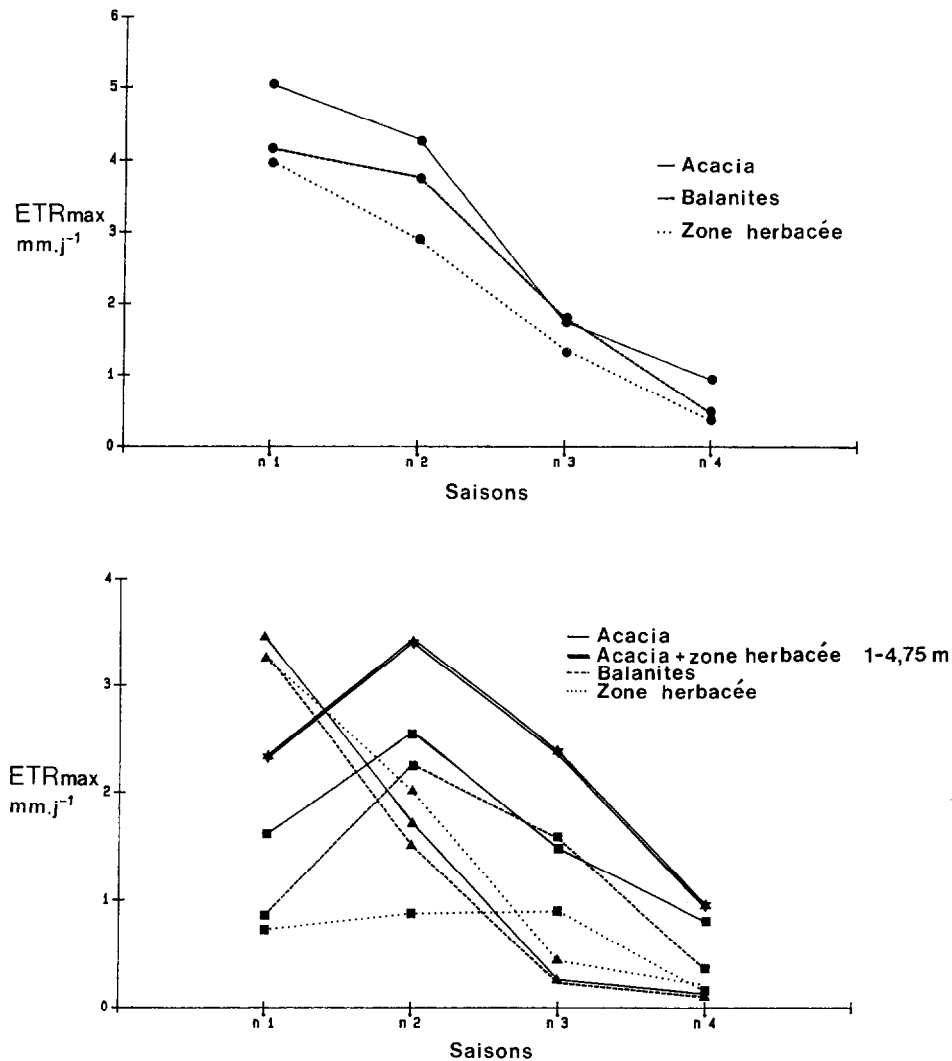


FIG. 2 – Évolution pendant les quatre saisons de l'évapotranspiration maximale journalière (mm.j<sup>-1</sup>) du bosquet d'*Acacia tortilis* (—), du bosquet de *Balanites aegyptiaca* (- - -), de la zone herbacée (....)  
 En haut : pour une profondeur de sol de 0,00 à 4,75 m (●) ;  
 En bas : pour deux profondeurs de sol : de 0,00 à 1,00 m (▲) et de 1,00 à 4,75 m (■) ; et évolution de l'ensemble (bosquet d'*Acacia tortilis* + zone herbacée) de 1,00 à 4,75 m (◆◆).  
 Mean daily maximal actual evapotranspiration (mm.day<sup>-1</sup>) *Acacia tortilis* grove (—), *Balanites aegyptiaca* grove (- - -) and herbaceous zone (....) (a) from 0.00 to 4.75 m depth (●) ; (b) from 0.00 to 1.00 m depth (▲) and from 1.00 to 4.75 m depth (■) ; *Acacia tortilis* grove and herbaceous zone from 1.00 to 4.75 m depth (◆◆).

*Balanites aegyptiaca* et la zone herbacée quatre fois plus. Puis la situation s'inverse lors de la période n° 2 et se maintient le reste de l'année : les ETR journalières maximales correspondant au bas du profil sont supérieures à celles du haut du profil. Dans le cas particulier de la zone herbacée, on peut raisonnablement supposer que l'absorption

qui a lieu de 1,00 à 4,75 m est le fait d'*Acacia tortilis* pour deux raisons : 1° – cette absorption existe durant les périodes n° 1, n° 2, n° 3 et n° 4 (0,73-0,88-0,90-0,15 mm.j<sup>-1</sup>) alors qu'il n'y a plus d'herbes fonctionnelles en période n° 3 et n° 4 ; 2° – d'après les profils hydriques (NIZINSKI *et al.*, 1994) *Acacia tortilis* coloniserait la zone herbacée

de 2,0 à 3,5 m, ce qui n'est pas le cas de *Balanites aegyptiaca*.

De 0 à 1,00 m : en saison des pluies l'ETR journalière maximale est constante quel que soit le type de couvert (fig. 2b), herbacées seules (3,25 mm.j<sup>-1</sup>) ou bosquet (*Acacia tortilis* : 3,44 mm.j<sup>-1</sup>; *Balanites aegyptiaca* : 3,29 mm.j<sup>-1</sup>), soit 3,31 mm.j<sup>-1</sup> pour la steppe ; cette valeur est comparable à celle de CORNET (1981) (même profondeur, même période) : 3,5 mm.j<sup>-1</sup>. Puis au fur et à mesure de l'avancement de la saison sèche, l'ETR de la zone herbacée devient supérieure à celles des bosquets (qui elles ne se différencient pas), soit respectivement pour la zone herbacée puis les bosquets à *Acacia tortilis* et à *Balanites aegyptiaca* (fig. 2b) : 2,01-1,72-1,50 mm.j<sup>-1</sup> (période n° 2) ; 0,44-0,26-0,23 mm.j<sup>-1</sup> (période n° 3) ; 0,21-0,13-0,10 mm.j<sup>-1</sup> (période n° 4). Lors des périodes n° 3 et n° 4, les zones herbacées hors et sous couvert sont des zones de sol plus ou moins nu (restes de tiges mortes et litière), la présence des arbres des bosquets limite donc les pertes en eau du sol. Ces pertes sont dues à l'évaporation du sol seule dans le cas des zones hors couvert et à l'évaporation du sol et à l'absorption des racines d'arbres dans le cas des bosquets. D'après l'évolution des profils hydriques au cours de la saison sèche (NIZINSKI *et al.*, 1994), il y a dessèchement progressif du haut du sol pour les zones hors couvert sans constitution d'un mulch ; on observe le même dessèchement progressif pour les bosquets et on peut en déduire que la part de l'absorption des arbres (dans ce premier mètre de sol) par rapport à l'évaporation du sol décroît au cours de la saison sèche : par exemple pour *Acacia*, la profondeur de sol où l'absorption peut exister (potentiel hydrique égal ou supérieur à -1,6 MPa) varie de 0,6 mètre (de 0,4 à 1,0 m) en début de saison sèche à 0,1 mètre (de 0,9 à 1,0 m) en fin de saison sèche.

De 1,0 à 4,75 m : l'absorption par *Acacia tortilis* de l'eau du bas du profil de la zone herbacée n'est pas négligeable, en particulier lors de la période n° 3. Elle représenterait 25 à 30 % (période n° 1 et n° 2), 40 % (période n° 3) et 15 % (période n° 4) de l'absorption d'*Acacia tortilis*. L'absorption d'*Acacia tortilis* dans son bosquet est supérieure à celle de *Balanites aegyptiaca*, sur l'ensemble de l'année (à l'exception de la période n° 3 où les absorptions sont semblables) (fig. 2b) ; si on ajoute à cette absorption celle correspondant à la zone herbacée colonisée, l'absorption d'*Acacia tortilis* est alors très nettement supérieure à celle de

*Balanites aegyptiaca*, soit respectivement pour *Acacia tortilis* et *Balanites aegyptiaca* : 2,33 et 0,86 mm.j<sup>-1</sup> (période n° 1), 3,44 et 2,26 mm.j<sup>-1</sup> (période n° 2), 2,37 et 1,56 mm.j<sup>-1</sup> (période n° 3), 0,95 et 0,36 mm.j<sup>-1</sup> (période n° 4). Alors que l'eau n'est pas limitante en période n° 1, les absorptions d'*Acacia tortilis* et de *Balanites aegyptiaca* sont inférieures à ce qu'elles seront pendant la période n° 2 lors de laquelle elles seront à leur maximum (saison dite « différée » à juste titre) : on peut supposer que c'est pendant la période n° 2 qu'il y a le maximum de racines absorbantes, la croissance racinaire ayant débuté en période n° 1. Il faut aussi remarquer que l'absorption d'*Acacia tortilis* et de *Balanites aegyptiaca* pendant la période n° 3 (fig. 2b) est encore importante (alors que les pluies ont cessé depuis au minimum cinq mois) : proche de celle de la période n° 1 pour *Acacia tortilis*, supérieure à celle de cette période pour *Balanites aegyptiaca*.

#### Écoulement le long des troncs, précipitations au sol et interception nette

L'écoulement le long des troncs n'a été mesuré que sur *Acacia tortilis* : il représente 2,8 % de Pi ; il n'a pas été mesuré sur *Balanites aegyptiaca* car on a supposé : 1° – qu'il serait faible pour les deux espèces, inférieur à l'erreur commise sur Pi (5 %), à cause du type de pluies (averses violentes), et 2° – qu'il serait plus élevé pour *Acacia tortilis* que pour *Balanites aegyptiaca*, la pente des branches d'*Acacia tortilis* (cime en parasol) favorisant plus l'écoulement le long des troncs que celle des branches de *Balanites aegyptiaca* (cime en boule, branches sinueuses avec de nombreuses ramifications). Pour 1989, 1990, 1991, années à régime hydrique comparable (Pi<sub>1989</sub> = 226,5 mm, Pi<sub>1990</sub> = 172,0 mm, Pi<sub>1991</sub> = 148,3 mm), les précipitations au sol s'élèvent en moyenne à 88,8 % de Pi pour le bosquet à *Acacia tortilis*, et à 84,8 % de Pi pour le bosquet à *Balanites aegyptiaca* ; ces pourcentages étant constants d'une année à l'autre. Le fait que les précipitations au sol soient plus importantes pour le bosquet à *Acacia tortilis* que pour le bosquet à *Balanites aegyptiaca* (4,0 % de différence) s'explique, pour une même valeur de l'écoulement le long des troncs, par une interception plus faible pour *Acacia tortilis* (8,4 % de Pi – en moyenne sur les trois années) que pour *Balanites aegyptiaca* (12,4 % de Pi – en moyenne sur les trois années), due à une capacité de rétention en eau des couronnes d'arbres plus faible pour *Acacia tortilis* –

2,89 mm – que pour *Balanites aegyptiaca* – 3,84 mm – (ces capacités de rétention ont été obtenues à partir des régressions linéaires  $P_s$  cumulé :  $f [P_i \text{ cumulé}]$ ). Les couronnes d'arbres des deux espèces ont des morphologies très différentes : les couronnes d'*Acacia tortilis* (branches vivantes, feuilles) sont moins « denses » que celles de *Balanites aegyptiaca* constituées d'un enchevêtrement de branches vivantes et mortes avec deux types de morphologie foliaire, des feuilles en forme d'épines (fortement majoritaires) et des feuilles planes.

### Rôle du couvert ligneux sur le bilan hydrique de la steppe

Sur l'ensemble de l'année et pour la totalité du sol exploité (4,75 m), l'ETR maximum journalière du bosquet à *Acacia tortilis* est supérieure à celle du bosquet à *Balanites aegyptiaca*, elle-même supérieure à celle de la zone herbacée (fig. 2a). En tenant compte de la colonisation de la zone herbacée par *Acacia tortilis*, les différences entre les ETR s'amplifient (fig. 3). L'ensemble des zones herbacées de la steppe n'est certainement pas entièrement colonisé : on doit avoir une situation intermédiaire entre celles des fig. 2a et fig. 3. En termes de bilan d'eau du sol, en moyenne sur

l'année, le stock d'eau du sol de la zone herbacée est supérieur à celui du sol du bosquet de *Balanites aegyptiaca*, lui-même supérieur à celui du sol du bosquet d'*Acacia tortilis*. À partir des différences (stock d'eau du sol du bosquet d'*Acacia tortilis* moins stock d'eau du sol du bosquet de *Balanites aegyptiaca* et stock d'eau du sol du bosquet d'*Acacia tortilis* moins stock d'eau du sol de la zone herbacée) on obtient un stock d'eau que l'on qualifiera « d'eau en excès » (sous-entendu par rapport au sol du bosquet à *Acacia tortilis* dans le cas de bosquet à *Balanites aegyptiaca* et de la zone herbacée). Avec *Balanites aegyptiaca*, on a là l'exemple d'une espèce moins consommatrice en eau qu'*Acacia tortilis* et qui aurait de l'eau disponible lors d'une année sans pluies ; dans le cas des zones herbacées, on peut supposer que cette « eau en excès » pourrait être utilisée si ces zones étaient boisées : on parlera de « réserve en eau non utilisée » pour désigner la différence de réserve en eau entre le sol des zones herbacées et le sol des bosquets à *Acacia tortilis*, et la situation en fin de saison sèche rendra compte de la « réserve en eau non utilisée » restant après un cycle de végétation. Ainsi, la « réserve en eau non utilisée » a été de 26,7 mm en fin de saison sèche 1990-1991 (18 juillet 1991 ;  $P_{i1990}$  : 172,0 mm) et de 28,0 mm

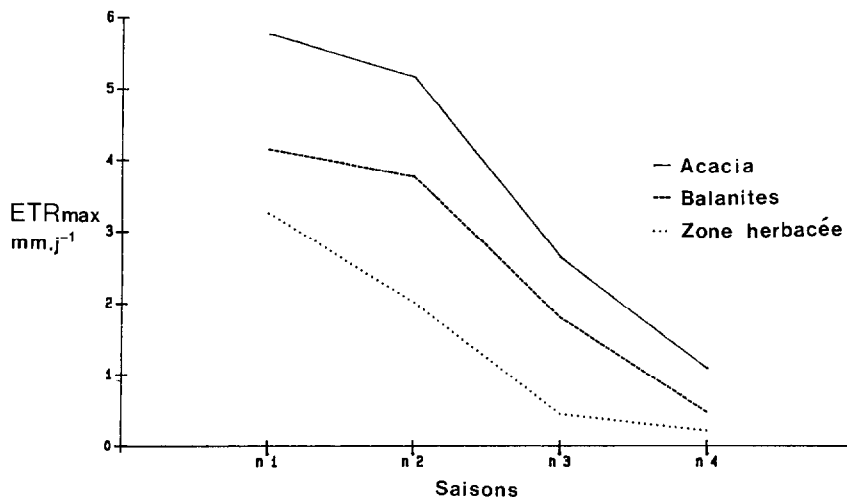


FIG. 3 – Évolution pendant les quatre saisons de l'évapotranspiration maximale journalière ( $\text{mm.j}^{-1}$ ) de l'ensemble (bosquet d'*Acacia tortilis* de 0,00 à 4,75 m + zone herbacée de 1,00 à 4,75 m) (—), du bosquet de *Balanites aegyptiaca* de 0,00 à 4,75 m (- - -), de la zone herbacée de 0,00 à 1,00 m (···).

Mean daily maximal actual evapotranspiration ( $\text{mm.day}^{-1}$ ) of an *Acacia tortilis* grove from 0.00 to 4.75 m soil depth with herbaceous zone from 1.00 to 4.75 m depth (—), of a *Balanites aegyptiaca* grove from 0.00 to 4.7 m depth (- - -) and of a herbaceous zone from 0.00 to 1.00 m depth (···).

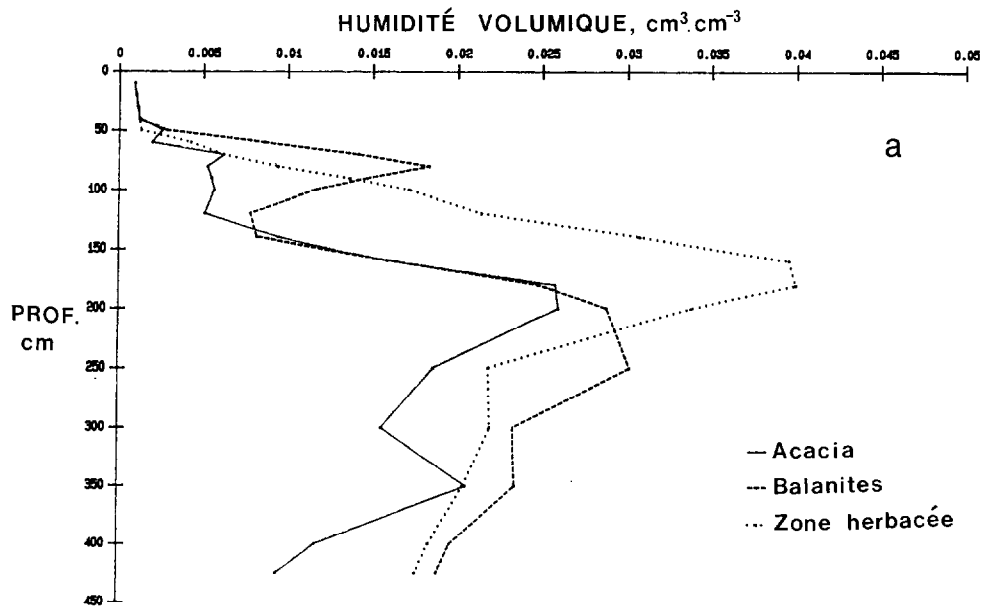


en fin de saison sèche 1991-1992 (2 juillet 1992 ;  $P_{i1991}$  : 148,3 mm), ce qui représente respectivement 12,1 % et 14,0 % des précipitations incidentes annuelles. En comparant les profils hydriques (humidité volumique) des deux bosquets et de la zone herbacée (fig. 4a, b, c, ici fin de saison sèche 1990-1991), on obtient les profondeurs de sol où se localise cette « eau en excès » : pour la zone herbacée de 1,0 m à 2,0 m et autour de 2,5-3,0 m (fig. 4b) ; pour le bosquet de *Balanites aegyptiaca*, de 0,6 m à 1,2 m et de 2,0 m à 3,5 m (fig. 4c), ces zones restant inchangées au cours du temps. La figure 4a illustre le fait que *Balanites aegyptiaca* n'a pas (ou peu) de racines absorbantes au-delà de 2,0 m (réserve en eau du sol la plus importante) et qu'*Acacia tortilis* colonise la zone herbacée à partir de 2,0 m (réserve en eau du sol intermédiaire entre celle du sol du bosquet de *Balanites aegyptiaca* et celle du sol du bosquet d'*Acacia tortilis*).

Ce bilan hydrique concerne la steppe de 1989, 1990, 1991, années déficitaires, or cette steppe évolue rapidement : le peuplement d'*Acacia tortilis* est soumis à un déboisement intensif, la surface des zones herbacées et de sol nu augmente. La surface terrière du peuplement étudié, représentative pour la région en 1989 (date de mise en défens de la station d'études) était de 3,87 m<sup>2</sup>.ha<sup>-1</sup>. L'analyse de la structure du peuplement permet d'affirmer que cette surface terrière aurait dû être plus importante s'il n'y avait pas de prélèvement de bois (dans la pyramide des circonférences des individus d'*Acacia tortilis*, les circonférences de 1,1-1,2-1,6-1,7 m sont absentes ; les circonférences de 0,7-0,9 m fortement déficitaires). À partir de la « réserve en eau non utilisée » estimée pour la zone herbacée, on peut calculer une « réserve en eau non utilisée » moyenne pour la steppe puis estimer à quel peuplement d'*Acacia tortilis* elle correspondrait. On a divisé la station d'étude (1 ha) en surfaces de 10 m<sup>2</sup> (100 unités) et défini les surfaces terrières de chaque unité de 10 m<sup>2</sup>. La « réserve en eau non utilisée » de la zone herbacée est de 26,7-28,0 mm pour une surface terrière (exprimée en m<sup>2</sup> pour 10 m<sup>2</sup> du sol) de 0 m<sup>2</sup>, et la « réserve en eau non utilisée » du bosquet d'*Acacia tortilis* est de 0 mm pour une surface terrière de 0,14 789 m<sup>2</sup>. De la relation linéaire [« réserve en eau non utilisée » = f (surface terrière)], on obtient la valeur moyenne de la « réserve en eau non utilisée » de la steppe (supposée n'être peuplée que d'*Acacia tortilis*) :

20,82 mm (208,13 m<sup>3</sup>.ha<sup>-1</sup>). Connaissant l'efficacité d'utilisation de la pluie pour la production de bois (masse de bois produite par mm de pluie) de la zone écoclimatique sahélienne, 0,3 m<sup>3</sup>.ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup>.mm<sup>-1</sup> (BAILLY *et al.*, 1982 ; MENAULT, 1983) ou 0,66 à 1,00 kg MS ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup>.mm<sup>-1</sup> (BILLE, 1977 ; POUPON, 1980), cette steppe aurait pu produire 6,25 m<sup>3</sup>.ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup> ou bien 13,74 à 20,82 kg MS ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup> de bois en plus, soit 7,4 % de la production moyenne annuelle (186 à 282 kg MS ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup> avec  $P_i = 282,4$  mm, moyenne annuelle). D'autre part, connaissant : 1° – l'ETR moyenne des bosquets sur trois années (165,1 mm.an<sup>-1</sup>) ; 2° – le recouvrement des bosquets dans la steppe actuelle (pourcentage de surface de sol occupée par les couronnes d'arbres) qui est de 37,6 % (3 755 m<sup>2</sup>.ha<sup>-1</sup>) d'après AKPO (1992), on peut calculer le recouvrement qu'aurait un peuplement d'*Acacia tortilis* dont l'ETR serait égale à la « réserve en eau non utilisée » de la steppe (455 m<sup>2</sup>.ha<sup>-1</sup>), et transformer ce recouvrement en nombre d'arbres d'une taille donnée en utilisant : 1° – la relation allométrique de AKPO (1992) entre le recouvrement et la circonférence à la base du tronc d'individus d'*Acacia tortilis* ; 2° – la relation allométrique de POUPON (1980) entre cette circonférence et la biomasse aérienne ligneuse d'*Acacia tortilis*. La « réserve en eau non utilisée » correspondrait à l'évapotranspiration d'un bosquet de 10 arbres, arbres d'une hauteur de 6,5 m et d'une circonférence de 0,84 m.

Dans le bilan radiatif de la steppe, une augmentation du recouvrement par les bosquets provoquerait une diminution de l'albédo (albédo des couronnes d'arbres inférieure à celle des zones herbacées elle-même inférieure à l'albédo du sol nu) et provoquerait une augmentation du rayonnement net (transformé essentiellement en chaleur sensible et chaleur latente). Dans le bilan énergétique de la steppe, une augmentation de l'ETR serait équilibrée par une diminution de la chaleur sensible, et d'après les modèles de circulation générale (General Circulation Models – GCMs), l'augmentation de l'ETR de 20,82 mm sur l'année se traduirait dans cette zone sahélienne : 1° – par une diminution de 1,5 °C de la température moyenne annuelle de l'air (MYLNE et ROWNTREE, 1992) (diminution du flux de chaleur sensible et de la température de surface malgré la diminution de l'albédo ; 505,75 MJ.m<sup>-2</sup> sont nécessaires pour évaporer 20,82 mm à 30 °C, ce qui représente



l'équivalent de  $16,04 \text{ W.m}^{-2}$  de chaleur sensible pour l'année) ; 2° – par une augmentation des précipitations incidentes de  $0,52 \text{ mm.jour}^{-1}$  (SUD and FENNESSY, 1982, 1984) à  $0,91 \text{ mm.jour}^{-1}$  (CHARNEY *et al.*, 1977).

## CONCLUSIONS

Il existe une différence d'un facteur 2 entre l'ETR maximale journalière de la zone herbacée et celle du bosquet d'*Acacia tortilis* à certains moments de l'année, à conditions climatiques égales et à entrées d'eau dans le sol égales (faible pente, sarclage de la croûte, pas de ruissellement). Ces différences entre ETR s'amplifient dans d'autres situations topographiques : il peut exister une différence d'un facteur 10 entre l'ETR en haut de dune et l'ETR en bas de pente (CORNET, 1981) due en partie à des entrées d'eau dans le sol différentes (ruissellement). Toutes les unités de végétation de la steppe doivent donc être prises en compte dans les études d'évapotranspiration en particulier pour fournir des données cohérentes pour les modèles globaux (GCMs) qui, à partir des modifications du couvert, prévoient des changements climatiques. On a aussi constaté qu'il existe des différences d'ETR non négligeables entre le bosquet d'*Acacia tortilis* et le bosquet de *Balanites aegyptiaca* : le couvert arborescent et arbustif de la steppe sahélienne est constitué d'espèces qui se

caractérisent par des adaptations à la sécheresse très diverses (FOURNIER, 1993), avec des stocks d'eau des sols correspondants variables ; ainsi en fin de saison sèche 1991 et 1992, il existe de l'« eau en excès » dans le sol du bosquet de *Balanites aegyptiaca* par rapport au sol du bosquet d'*Acacia tortilis*. Ceci est une autre source de complexité des études d'évapotranspiration de la steppe. D'un point de vue technique, les études d'évapotranspiration de la steppe se heurtent à des difficultés : 1° – en saison sèche, on atteint les limites d'utilisation de la méthode neutronique, les teneurs en eau mesurées présentant un écart-type très proche de la mesure neutronique elle-même ( $+0,01 \text{ cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ) (observé également par VACHAUD *et al.*, 1991) ; ces mesures doivent donc être associées à des mesures micrométéorologiques (rapport de Bowen) ; 2° – lorsque l'on met en défens une parcelle expérimentale dans les zones pâturées de cette steppe, il faut simuler le piétinement du bétail en sarclant la surface avant les premières pluies, sinon il y aura ruissellement là où, avec le piétinement, l'eau s'infiltrerait dans le sol.

## REMERCIEMENTS

Cette étude a été financée par l'Orstom. Les auteurs remercient Monsieur M'Baye YOUNG pour son aide sur le terrain.

Manuscrit accepté par le Comité de rédaction le 17 mars 1994.

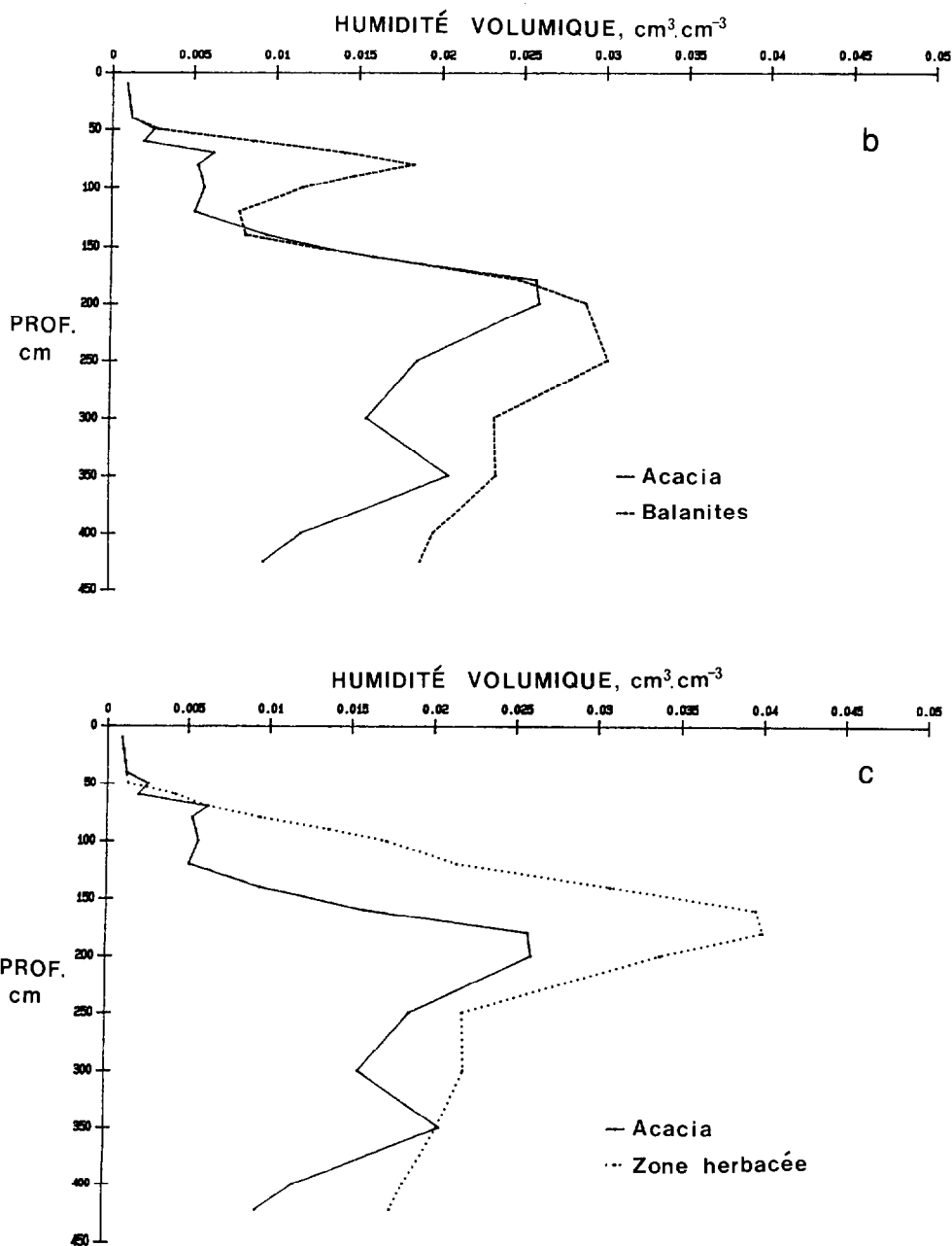


FIG. 4 – Profils hydriques, humidité volumique (cm<sup>3</sup>.cm<sup>-3</sup>) en fonction de la profondeur (cm), du 18 juillet 1991 des sols ; (a) des bosquets d'*Acacia tortilis* (—), de *Balanites aegyptiaca* (- - -) et de la zone herbacée (···) ; (b) des bosquets d'*Acacia tortilis* (—) et de *Balanites aegyptiaca* (---), avec les zones d'« eau en excès » du sol du bosquet de *Balanites aegyptiaca* par rapport au sol du bosquet d'*Acacia tortilis* ; (c) du bosquet d'*Acacia tortilis* (—) et de la zone herbacée (···), avec les zones d'« eau en excès » du sol de la zone herbacée par rapport au sol du bosquet d'*Acacia tortilis*.  
Soil-water content profiles (cm<sup>3</sup>.cm<sup>-3</sup>), on 18 July 1991 ; (a) *Acacia tortilis* grove (—), *Balanites aegyptiaca* grove (- - -) and the herbaceous zone (···) ; (b) *Acacia tortilis* grove (—) and *Balanites aegyptiaca* grove (- - -) with " surplus water content " zones ; (c) *Acacia tortilis* grove (—) and the herbaceous zone (···) with " surplus water content " zones.

## BIBLIOGRAPHIE

- AKPO (L.E.), 1992. – *Influence du couvert ligneux sur la structure et le fonctionnement de la strate herbacée en milieu sahélien. Les déterminants écologiques*. Thèse de 3<sup>e</sup> cycle, université Cheikh Anta Diop, Dakar, 174 p.
- ANONYME 1988. – *Introduction au projet « Écosystèmes pastoraux sahéliens »*. GEMS, série SAHEL, PNUE, Rome, Éditions FAO, 146 p.
- BAILLY (C.), BARBIER (J.), CLÉMENT (J.), GOUDET (J.P.) HAMEL (O.), 1982. – *The problems of satisfying the demand for wood in the dry regions of tropical Africa: knowledge and uncertainties*. CTFT, Nogent-sur-Marne, 24 p.
- BILLE (J.C.), 1977. – *Étude de la production primaire nette d'un écosystème sahélien*. Paris, Trav. et Doc. de l'Orstom, n° 65, 81 p.
- CHARNEY (J.G.), QUIRK (W.J.), CHEW (S.M.), KORNFELD (J.), 1977. – A comparative study of the effects of albedo change on drought in semi-arid regions. *Journal of Atmosphere Science*, 34 : 1360-1388.
- COLE (M.M.), 1986. – *The Savannas*. New York, Academic Press, 456 p.
- CORNET (A.), 1981. – *Le bilan hydrique et son rôle dans la production de la strate herbacée de quelques phytocénoses sahéliennes au Sénégal*. Thèse de Docteur-Ingénieur, université des Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier, 354 p.
- FOGG (G.E.) [éd.], 1965. – *The stage and movement of water in living organisms*, 19<sup>th</sup> Symp. Soc. Exp. Biol., The company of Biologists Cambridge University Press.
- FOURNIER (Ch.), 1993. – *Fonctionnement hydrique de six espèces ligneuses coexistant dans une savane sahélienne (Région du Ferlo, Nord-Sénégal)*. Thèse de Doctorat, université de Paris-Sud, Orsay, 130 pages.
- LAMACHERE (J.M.), 1991. – *Aptitude au ruissellement et à l'infiltration d'un sol sableux fin après sarclage*. In : M.V.K. SIVAKUMAR, J.S. WALLACE, C. RENARD et C. GIRAUX (éds.), 1991 : 109-119.
- LE HOUEROU (H.N.), 1989. – *The grazing land ecosystems of the African Sahel*. Ecological studies, vol. 75, Berlin, Springer-Verlag, 282 p.
- MARIAUX (A.), 1975. – *Essai de dendroclimatologie en climat sahélien sur Acacia raddiana. Bois et Forêts des Tropiques*, 163 : 27-35.
- MARSHALL (T.J.) HOLMES (J.W.), 1988. – *Soil physics*. 2<sup>e</sup> édition, Cambridge, Cambridge University Press, 374 p.
- MASSMAN (W.J.), 1992. – A surface energy balance method for partitioning evapotranspiration data into plant and soil components for a surface with partial canopy cover. *Water Resources Research*, 28 : 1723-1732.
- MENAULT (J.C.), 1983. – *Structure et production de peuplements de ligneux fourragers*. In : B. TOUTAIN *et al.*, (éds.), 1983 : 17-55.
- MONTEITH (J.L.), 1965. – *Evaporation and environment*. In : G.E. FOGG (Ed.) : 205-234.
- MYLNE (M.F.), ROWNTREE (P.R.), 1992. – *Modelling the effects of albedo change associated with tropical deforestation*. *Climatic Change*, 21 : 317-343.
- NIZINSKI (J.), MORAND (D.) FOURNIER (Ch.), 1994. – *Actual evapotranspiration of a thorn scrub with Acacia tortilis and Balanites aegyptiaca (North Senegal)*. *Agricultural and Forest Meteorology*.
- PENMAN (H.L.), 1948. – *Natural evaporation from open water, bare soil and grass*. *Proceedings of the Royal Society London A*, 193 : 120-145.
- POUPON (H.), 1980. – *Structure et dynamique de la strate ligneuse d'une steppe sahélienne au nord du Sénégal*. Paris, Orstom, Études et Thèses, 317 p.
- SIVAKUMAR (M.V.K.), WALLACE (J.S.), RENARD (C.), GIRAUX (C.) [Éds.], 1991. – *Soil water balance in the Sudano-Sahelian zone*, Proceedings of the Niamey Workshop, IAHS Publ. n° 199.
- SUD (Y.C.), FENNESSY (M.), 1982. – A study of the influence of surface albedo on July circulation in semi-arid regions using the GAS GCM. *Journal of Climatology*, 2 : 105-125.
- SUD (Y.C.), FENNESSY (M.), 1984. – A numerical study of the influence of evaporation in semi-arid regions on July circulation. *Journal of Climatology*, 4 : 383-398.
- THOM (A.S.), 1971. – *Momentum absorption by vegetation*. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 97 : 414-428.
- TOUTAIN (B.) *et al.* [éds.], 1983. – *Espèces ligneuses et herbacées dans l'écosystème de Haute-Volta*. Gerdat- IEMVT-ENS-CNRS-Irbet, Paris.
- VACHAUD (G.), VAUCLIN (M.), CISSE (L.), 1991. – *Mesure in situ de la consommation en eau de culture pluviale par humidimétrie neutronique*. In : M.V.K. SIVAKUMAR, J.S. WALLACE, C. RENARD et C. GIRAUX eds, 1991 : 275-288.
- VAN BAVEL (C.H.M.), 1966. – *Potential evaporation : The combination concept and its experimental verification*. *Water Resources Research*, 2 : 455-467.