

# Effet de la fertilisation azotée de couverture et de la densité de semis sur la consommation hydrique d'une variété de mil au Niger

---

A. ALHASSANE<sup>1</sup>, S.B. TRAORÉ<sup>1</sup>, M. ZOUZOU<sup>2</sup>, B. SARR<sup>1</sup>, M. AMADOU<sup>3</sup>

## Résumé

Au Sahel, la production du mil connaît une baisse continue sous les effets conjugués de la dégradation des terres et de l'insuffisance des pluies. Face à cette situation, les services de recherche et de vulgarisation agricole ont préconisé l'augmentation de la densité de semis et l'apport de fertilisants pour augmenter la production agricole. L'objectif de cette étude était d'évaluer l'applicabilité de ces recommandations en analysant leur impact sur la consommation hydrique d'une variété de mil. Sur un sol sableux, relativement profond (1,20 à 1,80 m), la variété de mil ZATIB a été soumise à deux traitements de densité de semis (D1 = 8333 poquets ha<sup>-1</sup> et D2 = 15 625 poquets ha<sup>-1</sup>) associés à deux niveaux d'apport d'urée (N0 = 0 kg ha<sup>-1</sup> et N1 = 100 kg ha<sup>-1</sup>) pendant les saisons de pluies 2002 et 2003. L'humidité et l'évaporation du sol sous le couvert de la culture ont été mesurées pendant tout le cycle ainsi que l'indice de surface foliaire (LAI). Les paramètres climatiques ont été également mesurés à l'aide d'une station météorologique automatique. Les résultats ont montré que l'apport d'urée a eu un impact déterminant dans la variabilité de l'humidité du sol du fait qu'il a favorisé le développement foliaire des plants sous toutes les densités de semis. Par contre, l'effet de la densité de semis n'a été perceptible qu'en absence d'urée. En présence de déficit hydrique, la forte densité de semis a eu un impact négatif sur les plants ayant reçu de l'urée, ce qui suggère que l'utilisation des fortes doses d'urée (100 kg ha<sup>-1</sup>) ne peut être envisageable qu'en cas de faible densité de semis (8 333 poquets ha<sup>-1</sup>) pour une meilleure économie d'eau du sol dans les zones à forte variabilité pluviométrique comme le Sahel.

**Mots-clés :** Consommation hydrique, densité de semis, fertilisation azotée, mil, Niger, Sahel.

## Effect of top dress nitrogen fertilization and planting density on a pearl millet variety water consumption in Niger

### Abstract

In the Sahel, pearl millet production is declining due to the combined effects of land degradation and insufficient rainfall. This situation has prompted research and extension services to recommend intensification, namely high planting densities and use of fertilizers in order to increase food production. The objective of this study was to assess the applicability of those recommendations in the sahelian context by analyzing their impact on crop water consumption. On a sandy, relatively deep (1,20 to 1,80 m) soil, the ZATIB

---

<sup>1</sup> Centre Régional AGRHYMET (Centre Régional de formation et d'applications en agrométéorologie et hydrologie opérationnelles), Tél : (00227) 73 31 16, B.P : 11011, Niamey, Niger, s.traore@agrhytmet.ne

<sup>2</sup> Laboratoire de Physiologie végétale de l'UFR Biosciences à l'Université de Cocody, Tel : (00225) 22 44 03 07, 22 B.P : 852 Abidjan, Côte-d'Ivoire

<sup>3</sup> INRAN (Institut National de Recherche Agronomique du Niger), Tel : (00227) 72 53 89, B.P : 429 Niamey, Niger.

millet variety was tested under two planting densities ( $D1 = 8\ 333$  hills  $ha^{-1}$  and  $D2 = 15\ 625$  hills  $ha^{-1}$ ) associated with two nitrogen fertilizer rates in the form of urea ( $N0 = 0$  kg  $ha^{-1}$  and  $N1 = 100$  kg  $ha^{-1}$ ), during two rainy seasons (2002 and 2003). Measurements of soil moisture and soil evaporation, as well as leaf area index, were conducted throughout the crop cycle. An automatic weather station was also installed next to the plots to monitor the main climatic parameters. The results showed that application of urea was determinant in the variability of soil moisture content as it has greatly enhanced plants' leaf area development under all planting densities. On the contrary, the effect of planting density was significant only when there was no urea application. Under water deficit, the high planting density had a negative impact on plants having received urea. This suggests that the use of high rates of urea (100 kg  $ha^{-1}$ ) is conceivable only with low planting densities (8333 hills  $ha^{-1}$ ) in zones with erratic rainfall such as the Sahel.

**Keywords :** crop water consumption, planting density, nitrogen fertilization, millet, Niger, Sahel.

## Introduction

Au Sahel, zone éco-climatique située à la lisière sud du Sahara, les potentialités de production du mil connaissent une baisse continue résultant de la dégradation des terres, de l'insuffisance et de la mauvaise répartition spatio-temporelle des pluies. A cela s'ajoute un fort taux de croissance démographique ( $> 3\%$  en moyenne) qui contribue à exacerber l'insécurité alimentaire des populations (CILSS, 2002). Face à cette situation, les services de recherche et de vulgarisation agricole ont préconisé l'intensification des cultures, notamment l'augmentation de la densité de semis et l'apport de fertilisants (COULIBALY *et al.*, 1988 ; TRAORE, 1988 ; PIRAUX *et al.*, 1997) pour améliorer la productivité et satisfaire les besoins croissants en nourriture. Cependant, ces mesures sont susceptibles d'accroître les besoins en eau des cultures. Les différents travaux de recherche abordant cette problématique ont généralement été focalisés sur le comportement de la culture vis-à-vis de la sécheresse ou de la fertilité (DIOUF, 2000). Par ailleurs, les travaux de sélection de variétés adaptées à la sécheresse n'ont souvent pas tenu compte de l'impact spécifique ou conjugué des pratiques culturales (fertilisation, densité de semis) sur les besoins hydriques. Il est cependant établi que ces pratiques ont des effets différents sur la production du mil en fonction de la disponibilité en eau. Ainsi, BACCI *et al.* (1998) ont montré que l'application d'azote affecte positivement les rendements en pailles et en grains lorsqu'il n'y a pas de déficit hydrique pendant la croissance. SOGODOGO et SHETTY (1991) et HERRMANN *et al.* (1994) ont également indiqué que l'apport des fertilisants entraîne une augmentation des besoins en eau de la plante qui par conséquent devient plus sensible à la sécheresse. En effet, la production des traitements fertilisés est augmentée grâce au tallage plus important et au nombre plus élevé d'épis, d'où un potentiel de consommation hydrique plus élevé (MASON, 2001). D'un autre côté, les travaux de PAYNE *et al.* (1990), LAWSON et SIVAKUMAR (1991), DANCETTE (1991), VACHAUD et KLAIJ (1992) ont montré que les niveaux de consommation hydrique sont faibles lorsque le sol est pauvre, même si l'eau n'est pas un facteur limitant. L'abondance du feuillage de la plante joue un rôle fondamental dans sa consommation hydrique. Ainsi, KASSAM et KOWAL (1975) ont montré que le bilan hydrique dépend de la biomasse aérienne de la plante et que les périodes de forte consommation en eau correspondent à la phase d'abondance de la couverture végétative. Cette consommation s'évalue en terme d'évapotranspiration réelle (ETR) qui représente les pertes d'eau réelles du couvert végétal sous l'effet des conditions climatiques et, en particulier, des périodes d'alimentation hydrique déficitaire (DANCETTE, 1976).

Ainsi, la consommation hydrique de la plante dépend non seulement de la disponibilité en eau, mais aussi de sa surface foliaire totale. Pour une même variété, la surface foliaire est, elle aussi, la résultante des pratiques culturales comme la densité de semis et la fertilisation azotée dont l'interaction influence aussi bien la croissance que l'émission des feuilles et des talles. Cependant, la plupart des travaux sur l'évaluation des besoins en eau du mil ne tiennent pas compte de cette interaction. L'objectif de cette étude était d'analyser l'impact conjugué de la densité de semis et de l'apport d'azote (sous forme d'urée) sur la consommation hydrique du mil, afin de définir leur applicabilité comme mesures d'intensification agricole au Sahel.

## **Matériels et méthodes**

### **Conditions expérimentales**

L'essai a été conduit dans le domaine du Centre Régional AGRHYMET, Niamey, Niger (13° 29' N, 02° 10' E) pendant les saisons pluvieuses 2002 et 2003. Le sol est sableux, relativement profond (1,20 à 1,80 m) et très pauvre en matière organique (DENIS *et al.*, 1984). Il appartient aux classes Psammentic Paleustalf ou Cambic Arenosols selon DE ROUW (2004). Le climat est sahélien et se caractérise par un rayonnement global élevé (19,45 à 21 MJ m<sup>-2</sup> j<sup>-1</sup>) en dépit de la présence de nuages pendant la saison des pluies (BEGUE, 1991 ; AMADOU, 1994). Les températures journalières varient souvent entre 25 et 41 °C, selon le régime hydrique et l'état de végétation de la surface du sol. La saison des pluies commence généralement en mi-juin pour finir en mi-septembre (SIVAKUMAR, 1989). Elle se caractérise par une pluviométrie très variable dans le temps et dans l'espace (AMADOU, 1994). En ce qui concerne les saisons pluvieuses 2002 et 2003, elles ont eu presque la même date de démarrage (figures 1a et b), mais celle de 2002 a été caractérisée par plusieurs séquences sèches, notamment en juillet (20 - 33<sup>e</sup> jour après semis (JAS), août (48 - 58<sup>e</sup> JAS) et septembre (68 - 80 JAS), suivies de pluies tardives en octobre à partir du 80<sup>e</sup> JAS (figure 1a). C'est ainsi que le cumul pluviométrique de 2003 (531 mm) a été plus élevé que celui de 2002 (485,5 mm), malgré les pluies tardives d'octobre 2002.

### **Matériel végétal et traitements expérimentaux**

La variété de mil ZATIB dont la longueur du cycle est comprise entre 100 et 105 jours a été testée dans cet essai. Cette variété, sélectionnée à l'Institut National de Recherche Agronomique du Niger (INRAN), est issue du croisement entre deux variétés locales Zanfarwa et Tchinin Bajini de la région de Maradi au Niger. Elle est vulgarisée et cultivée dans les zones relativement bien arrosées du Niger (isohyètes 500-600 mm) pour son cycle semi-tardif.

Le dispositif expérimental était du type factoriel en blocs randomisés à trois répétitions. Les facteurs étudiés étaient la dose d'urée apportée en tant que fumure de couverture et la densité de semis dont l'application à divers niveaux permet d'obtenir une large gamme de variation de la biomasse aérienne, donc de la consommation hydrique. Deux doses d'urée (N0 = 0 kg ha<sup>-1</sup> et N1 = 100 kg ha<sup>-1</sup>) étaient croisées avec les densités de semis D1 = 8 333 poquets ha<sup>-1</sup> (écartements : 1 m / 1,20 m) et D2 = 15 625 poquets ha<sup>-1</sup> (écartements : 1 m / 0,80 m). Ces traitements ont été choisis pour quantifier l'effet des pratiques d'intensification (N1 et D2) et celles qui sont fréquemment observées en milieu paysan (N0 et D1) sur la consommation hydrique de la variété prometteuse de mil ZATIB.

Les semis ont été effectués le 11 juillet en 2002 et le 14 juin en 2003. Au semis, une dose de 140 kg ha<sup>-1</sup> d'engrais NPK (15-15-15) a été appliquée à toutes les parcelles élémentaires. L'urée dans le traitement N1 a été apportée en deux tranches de 50 kg ha<sup>-1</sup> au tallage et à la montaison, localement aux pieds des plants.

### Suivi des paramètres météorologiques

Une station météorologique automatique a été installée non loin de l'essai pour mesurer, aux pas de temps horaires et journaliers les paramètres météorologiques suivants : pluviométrie, température et humidité de l'air, vitesse et direction du vent, radiation solaire. Les données recueillies ont permis de calculer l'évapotranspiration potentielle (ET<sub>0</sub>) journalière selon la formule de Penman-Monteith (ALLEN *et al.*, 1998) :

$$ET_0 = \frac{900 \left( 0.408\Delta (R_n - G) + \gamma \frac{u_2(e_s - e_a)}{T + 273} \right)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34u_2)}$$

Avec : ET<sub>0</sub> = évapotranspiration de référence [mm jour<sup>-1</sup>], R<sub>n</sub> = radiation nette interceptée par la surface foliaire [MJ m<sup>-2</sup> jour<sup>-1</sup>], G = densité de flux de chaleur [MJ m<sup>-2</sup> jour<sup>-1</sup>], T = température de l'air à 2 m [°C], U<sub>2</sub> = vitesse du vent à 2 m [m s<sup>-1</sup>], e<sub>s</sub> = tension de vapeur à la saturation [kPa], e<sub>a</sub> = tension réelle de vapeur [kPa], e<sub>s</sub> - e<sub>a</sub> = déficit de saturation [kPa], Δ = pente de la courbe de tension de vapeur [kPa °C<sup>-1</sup>], γ = constante psychrométrique [kPa °C<sup>-1</sup>].

### Mesures de l'indice de surface foliaire (LAI)

L'évolution du LAI a été suivie en 2002 dans tous les traitements en utilisant la relation entre la surface d'une feuille et son poids sec (BEGUE, 1991 ; AMADOU, 1994). Les poids secs des feuilles sont obtenus à partir des prélèvements destructifs de toutes les feuilles vertes de 5 poquets consécutifs dans chaque traitement, pendant le tallage, la montaison, l'épiaison et à la récolte. Les feuilles sont coupées des tiges au niveau de la ligule, séchées à l'étuve (70 °C) pendant 72 heures, puis pesées à l'aide d'une balance électronique METTLER PE 2000. En 2003, en plus de la méthode précédente, la surface foliaire a été évaluée par mesures directes avec le planimètre optique Delta-T MK2 (type AMS) en prélevant au hasard, à chaque date d'observation, une vingtaine de feuilles de taille différentes. Les poids secs des mêmes feuilles mesurées avec le planimètre optique étaient déterminés après passage à l'étuve. La régression établie entre les surfaces de ces feuilles et leurs poids secs a permis d'estimer la surface foliaire de tous les échantillons de feuilles prélevés aussi bien en 2002 qu'en 2003. La surface foliaire est ensuite traduite en LAI (surface foliaire / surface de sol occupée), sachant que les 5 poquets consécutifs occupent 6 m<sup>2</sup> de surface du sol pour la densité D1 et 4 m<sup>2</sup> pour la densité D2.

### Suivi de l'humidité du sol

Le suivi de l'humidité du sol a été réalisé en 2002 par la méthode gravimétrique en prélevant, toutes les deux semaines, des échantillons de sol dans les parcelles élémentaires à l'aide d'une tarière. Les prélèvements étaient faits à raison d'un échantillon par parcelle élémentaire,

à 5, 10 et 20 cm de profondeur dans la frange superficielle du sol, puis tous les 20 cm au delà de cette frange jusqu'à 200 cm. En 2003, les mesures d'humidité du sol ont été faites à la sonde à neutrons, une fois par semaine tous les 20 cm dans la tranche de sol comprise entre 30 cm et 240 cm. Dans la partie superficielle du sol, les mesures ont été réalisées à la tarière aux profondeurs 5, 10 et 20 cm. Ici également, une seule mesure était effectuée par parcelle élémentaire à chaque passage. Les tranches du sol 0-40 cm et 0-80 cm ont été considérées pour l'étude des variations de l'humidité du sol en fonction des traitements appliqués.

### **Détermination de la densité apparente du sol**

Afin d'évaluer le stock d'eau disponible dans la zone racinaire, la densité apparente du sol a été mesurée par une série de prélèvements d'échantillons de sol, à différentes profondeurs dans des fosses creusées à cet effet. Les prélèvements étaient faits à l'aide d'un tube PVC de 4 cm de diamètre et 10 cm de hauteur. Le principe consiste à prélever des échantillons de sol correspondant au volume strict du tube qui est rempli par enfoncement vertical dans le sol. La manipulation est faite avec soin, de sorte à garder intacte la structure naturelle de l'échantillon de sol pendant le prélèvement. Deux échantillons étaient prélevés à chaque profondeur afin d'obtenir une valeur moyenne de densité apparente.

### **Calcul de la consommation hydrique**

La consommation en eau ou évapotranspiration réelle (ETR) a été calculée selon l'équation simple du bilan hydrique :

$$ETR = P \pm R - D + RC - \Delta S$$

où : P = apports en eau par les pluies, R = ruissellement, D = drainage profond, RC = remontée capillaire et  $\Delta S$  = variations du stock d'eau entre deux dates d'observations.

Dans le contexte de notre expérimentation où les sols sont sableux et généralement insuffisamment humectés, le ruissellement, le drainage et les remontées capillaires ont été considérés comme négligeables.

### **Suivi de l'évaporation du sol**

L'évaporation du sol a été mesurée sous le couvert du mil à l'aide de micro-lysimètres installés entre les poquets de mil à raison d'un par parcelle élémentaire. Les micro-lysimètres ont été confectionnés à partir de tubes PVC de diamètres différents (7,5 et 6,3 cm) qui ont été découpés en morceaux de 26 cm, pour le plus grand et 16 cm, pour le plus petit (photo 1). Le plus petit a été rempli de sable en l'enfonçant dans le sol, au centre de la parcelle élémentaire, de façon à ne pas perturber la structure initiale du sol. Afin d'éviter des pertes de grains de sable pendant le drainage et lors des observations, un tamis en nylon à très petites mailles a été appliqué sur la base inférieure du tube. Le tube a été ensuite placé au-dessus d'une boîte métallique vide (10 cm de hauteur) servant à récupérer les eaux de drainage. L'ensemble avait une hauteur totale de 26 cm qui équivaut à celle du grand tube PVC (photo 1a). La surface du sol à l'intérieur du micro lysimètre était maintenue au même niveau que celle du sol de la parcelle. Cependant, le bord supérieur du tube de protection était plus émergé pour empêcher l'entrée, dans le micro lysimètre, des eaux de ruissellement et du sable externe (photo 1b). Les micros lysimètres et l'eau

de drainage récupérée étaient pesés chaque matin entre 6 et 7 heures, quand l'évaporation du sol est supposée négligeable, à l'aide d'une balance électronique à pile de capacité 1 kg et de précision 1 g. Les mesures étaient réalisées du début tallage à la récolte. Dans l'analyse des résultats, nous avons retenu les valeurs obtenues pendant les jours ensoleillés pour comparer les différents traitements, dans la mesure où l'évaporation du sol est généralement négligeable pendant les jours de pluies ou de forte couverture nuageuse.



**Photo 1.** Eléments constitutifs des micro-lysimètres confectionnés pour mesurer l'évaporation du sol. AGRHYMET, 2003.

**a :** 1= tube de protection, 2 = tube du lysimètre rempli de sable, 3 = boîte de récupération d'eau de drainage.

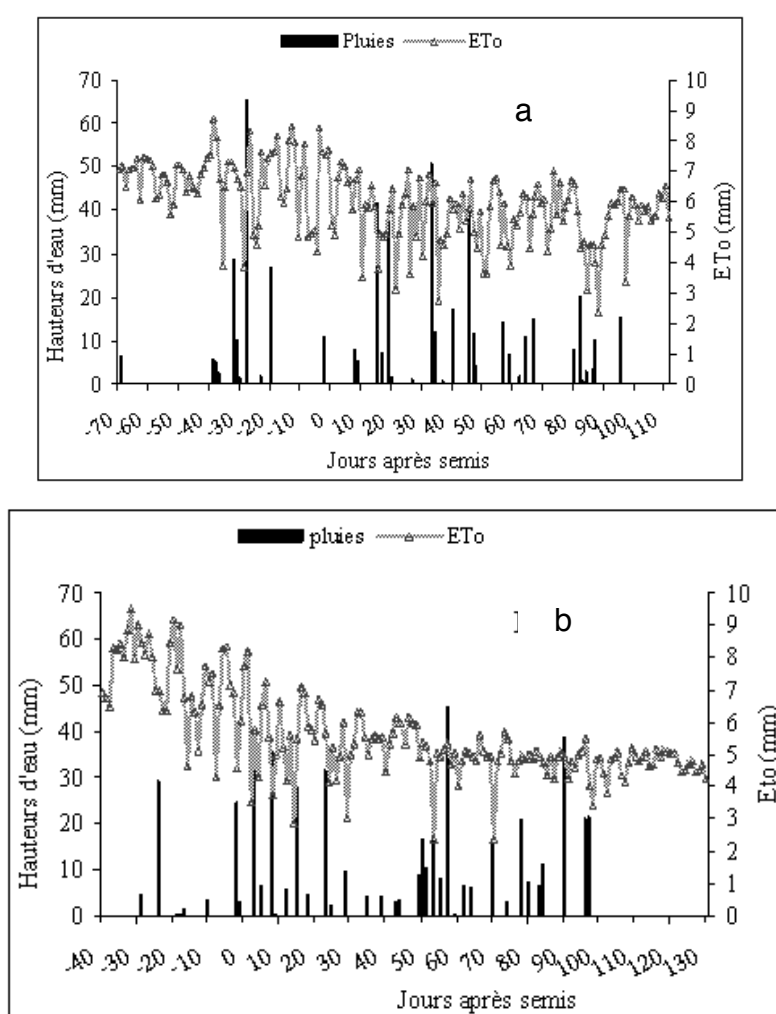
**b :** micro lysimètre entier placé dans le sol.

## Calcul de l'efficacité d'utilisation d'eau

L'efficacité d'utilisation d'eau ( $\text{kg mm}^{-1} \text{ha}^{-1}$ ) a été déterminée à partir du rapport entre le rendement grains ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) donné par chaque traitement et la consommation hydrique ou ETR (mm) évaluée sous l'effet du même traitement.

## Analyse statistique des résultats

Toutes les données de l'essai ont dans un premier temps été saisies sur le tableur Excel. Ce logiciel a été également utilisé pour le calcul de certaines moyennes et pour le tracé des graphiques. Certains résultats, notamment ceux des composantes du rendement, de l'humidité du sol et de consommation hydrique, ont été traités à l'aide du logiciel GENSTAT 6 pour l'analyse de la variance. La séparation des moyennes a été faite par la méthode LSD (plus petite différence significative, PPDS) et par l'écart type de la moyenne pour les illustrations graphiques.



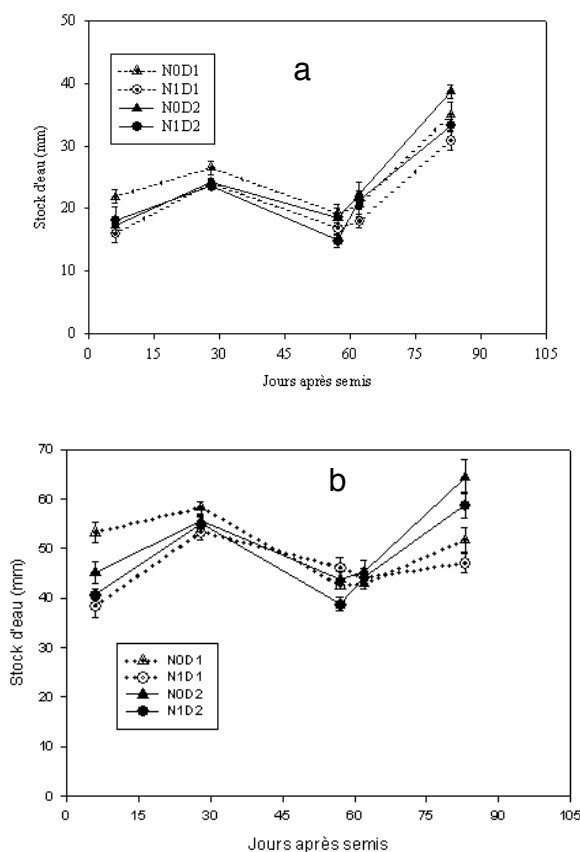
**Figure 1.** Pluviométries et évapotranspiration de référence (ETo) journalières en 2002 (a) et 2003 (b) au site expérimental AGRHYMET, Niamey.

## Résultats

### Densité apparente et stock hydrique du sol

Le suivi de l'évolution du stock d'eau dans les tranches du sol considérées dans cette étude a nécessité la détermination de la densité apparente du sol. Les valeurs issues de la méthode appliquée ont été uniformes sur l'ensemble du profil, avec une valeur moyenne de  $1,8 \text{ g cm}^{-3}$  ayant été utilisée pour les calculs des stocks d'eau dans les tranches sol 0-40 cm et 0-80 cm.

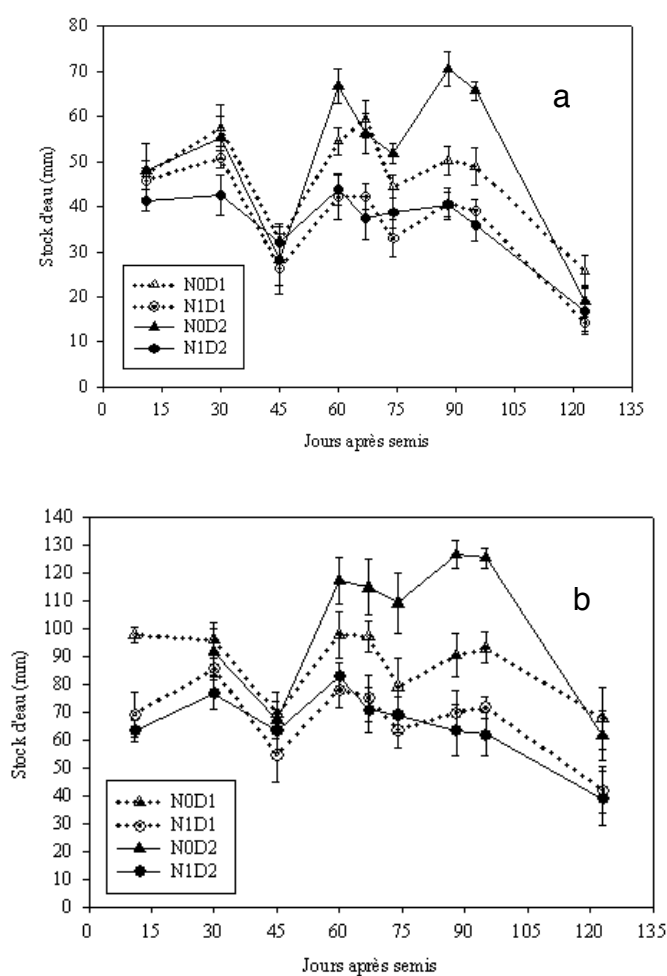
En 2002, les stocks hydriques dans la couche 0-40 cm n'ont pas connu de variations importantes et étaient sensiblement les mêmes pour tous les traitements, sauf celui de la faible densité de semis n'ayant pas reçu de l'urée (N0xD1) pour lequel le stock était légèrement plus élevé jusqu'au 50<sup>e</sup> JAS (figure 2a). Les variations étaient plus importantes dans la couche 0-80 cm, de même que les écarts entre traitements, avec toujours le traitement le N0xD1 ayant les stocks les plus élevés (figure 2b). Cependant, cette figure montre que les tendances ont été inversées vers la fin du cycle, avec le traitement de la forte densité de semis (D2) ayant eu des stocks hydriques significativement plus élevés que ceux de la faible densité.



**Figure 2.** Evolution du stock d'eau sous la variété de mil ZATIB soumise à deux densités de semis D1 (8333 poquets ha<sup>-1</sup>) et D2 (15625 poquets ha<sup>-1</sup>) et deux doses d'urée N0 (0 kg ha<sup>-1</sup>) et N1 (100 kg ha<sup>-1</sup>). AGRHYMET 2002. a : couche 0-40 cm, b : couche 0 - 80 cm. Les barres d'erreur indiquent l'écart type de la moyenne.



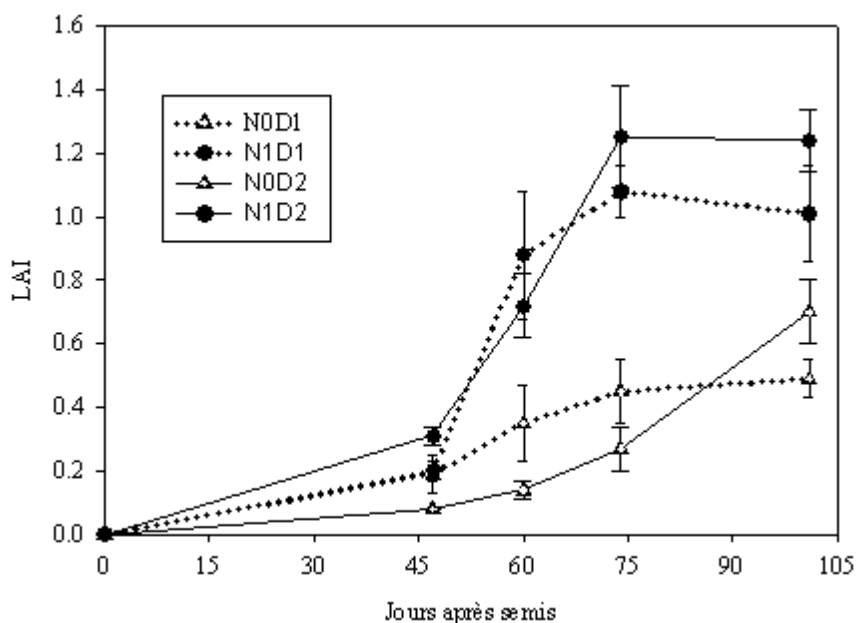
En 2003, les stocks hydriques dans les couches 0-40 cm et 0-80 cm ont été constamment plus élevés qu'en 2002 (figures 2 et 3). Par ailleurs, les écarts entre les traitements d'urée et de densité ont été plus grands qu'en 2002, entre le 45<sup>e</sup> et le 105<sup>e</sup> JAS (figures 2a et 3a). La densité de semis a eu un effet moins marqué que l'apport d'urée sur les variations du stock d'eau dans le sol (figure 3a). En absence d'urée, l'effet de la densité de semis est plus significatif, avec un stock d'eau plus élevé sous la forte (D2) que sous la faible densité (D1). Cependant, avec l'apport d'urée, les stocks d'eau étaient presque similaires sous les deux densités de semis (figure 3a). Les mêmes tendances ont été observées dans la couche 0-80 cm (figure 3b). Au-delà de 80 cm, les différences entre les traitements étaient faibles et le stock d'eau était presque constant vers la limite du front d'humectation. Le stock d'eau dans la couche 0-120 cm a été deux à trois fois plus élevé en 2003 qu'en 2002 durant toute la période entre le 60<sup>e</sup> et le 105<sup>e</sup> JAS. Il a atteint 180 mm sous le traitement N0xD1 et 130 mm sous le traitement N1xD2.



**Figure 3.** Evolution du stock d'eau sous la variété de mil ZATIB soumise à deux densités de semis D1 (8333 poquets ha<sup>-1</sup>) et D2 (15625 poquets ha<sup>-1</sup>) et deux doses d'urée N0 (0 kg ha<sup>-1</sup>) et N1 (100 kg ha<sup>-1</sup>). AGRHYMET 2003. a : couche 0-40 cm, b : couche 0 - 80 cm. Les barres d'erreur indiquent l'écart type de la moyenne.

## Indice de surface foliaire LAI

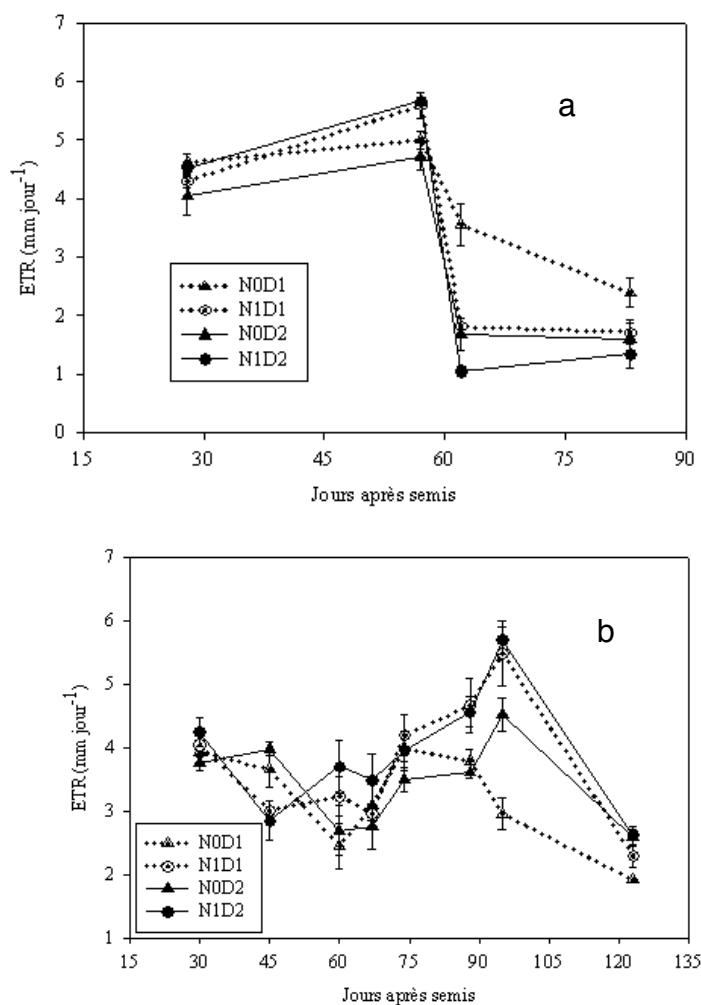
Comme on peut le constater (figure 4), l'indice de surface foliaire a varié dans le sens inverse des stocks hydriques, avec les traitements intensifiés ayant les LAI les plus élevés. Ici également, l'effet de l'urée a été plus important que celui de la densité de semis avec cependant une dynamique de LAI différente chez les traitements de densité selon qu'il y a eu apport d'urée ou pas. Ainsi, en début de cycle, c'est la faible densité de semis qui a eu les valeurs de LAI les plus élevées en l'absence d'urée, mais cette tendance s'est inversée plus tard. Avec l'apport d'urée, les valeurs de LAI ont été quasiment identiques pour les deux densités de semis.



**Figure 4.** Evolution de l'indice de surface foliaire (LAI) de la variété de mil ZATIB soumise à deux densités de semis D1 (8333 poquets ha<sup>-1</sup>) et D2 (15625 poquets ha<sup>-1</sup>) et deux doses d'urée N0 (0 kg ha<sup>-1</sup>) et N1 (100 kg ha<sup>-1</sup>). AGRHYMET 2003. Les barres d'erreur indiquent l'écart type de la moyenne.

## Evapotranspiration réelle (ETR)

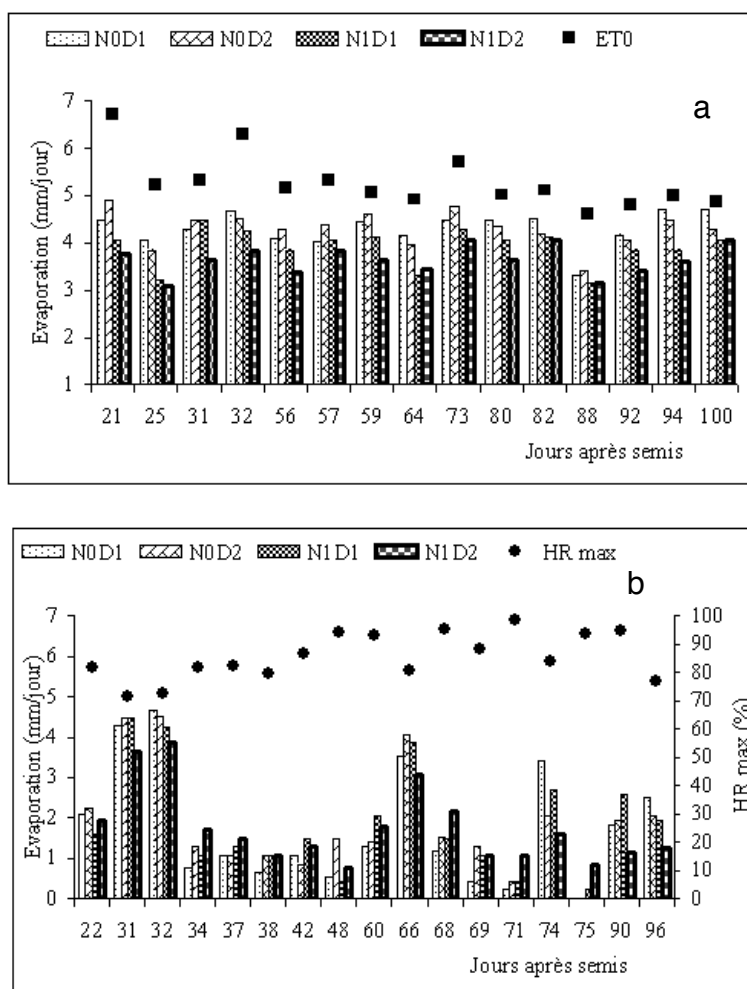
L'ETR a été plus élevée (figure 5) dans les traitements intensifiés (N1 et D2) que dans ceux non intensifiés (N0 et D1) aussi bien en 2002 qu'en 2003 durant les périodes où le stock d'eau était élevé : entre le 30<sup>e</sup> et le 60<sup>e</sup> JAS, en 2002 (figure 5a) et le 60<sup>e</sup> et 105<sup>e</sup> JAS, en 2003 (figure 5b). Toutefois, quand le stock d'eau était faible, les plus petites valeurs de l'ETR étaient observées avec les traitements intensifiés : à partir du 60<sup>e</sup> JAS en 2002 et vers le 45<sup>e</sup> JAS en 2003. En effet, la baisse du stock d'eau dans le sol, suite à la sécheresse observée en 2002 à partir du 50<sup>e</sup> JAS (figure 1a), a fait baisser l'ETR sous tous les traitements, notamment sous le plus intensifié (N1xD2) dont les besoins en eau des plants étaient plus élevés auparavant. Par contre, la baisse a été moins importante pour le traitement non intensifié (N0xD1) (figure 5a).



**Figure 5.** Evolution de l'évapotranspiration réelle (ETR) de la variété de mil ZATIB soumise à deux densités de semis D1 (8333 poquets ha<sup>-1</sup>) et D2 (15625 poquets ha<sup>-1</sup>) et deux doses d'urée N0 (0 kg ha<sup>-1</sup>) et N1 (100 kg ha<sup>-1</sup>). AGRHYMET 2002 (a) et 2003 (b). Les barres d'erreur indiquent l'écart type de la moyenne.

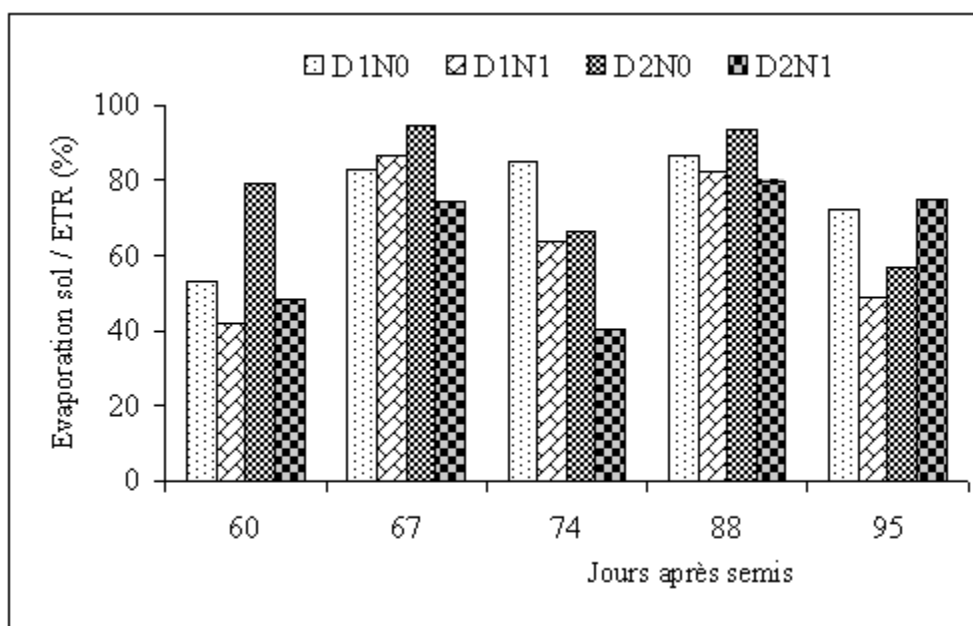
## Evaporation du sol

Les mesures d'évaporation du sol ont été effectuées seulement en 2003. Les résultats montrent que les parcelles à faible couverture foliaire (LAI), correspondant aux traitements n'ayant pas reçu d'urée (N0xD1 et N0xD2), avaient des valeurs constamment plus élevées que celles ayant reçu de l'urée (N1xD1 et N1xD2), quelle que soit la densité de semis (fig. 6b). La densité de semis a influencé l'évaporation du sol qui a été plus élevée en début de végétation, dans les parcelles de la forte densité de semis (D2) n'ayant pas reçu d'urée (N0). A partir du 64<sup>e</sup> JAS, les tendances se sont inversées, avec les parcelles à faible densité (D1) ayant les plus fortes valeurs d'évaporation. Chez les parcelles ayant reçu de l'urée, l'évaporation a toujours été plus élevée dans celles semées à faible densité.



**Figure 6.** Evolution de l'évaporation du sol relativement à l'évapotranspiration de référence ou ETo (a) et à l'humidité relative maximale ou RHmax (b) sous le couvert de la variété de mil ZATIB soumise à deux densités de semis D1 (8333 poquets ha<sup>-1</sup>) et D2 (15625 poquets ha<sup>-1</sup>) et deux doses d'urée N0 (0 kg ha<sup>-1</sup>) et N1 (100 kg ha<sup>-1</sup>). AGRHYMET 2003.

D'une manière générale, l'évaporation du sol a évolué dans le même sens que l'évapotranspiration de référence (ET0) (fig. 6a). Cependant, il y a eu des jours où les évaporations ont été plus élevées dans les micro-lysimètres mieux couverts par la végétation que dans ceux qui étaient exposés, notamment aux 34<sup>e</sup>, 37<sup>e</sup>, 42<sup>e</sup>, 60<sup>e</sup>, 68<sup>e</sup>, 71<sup>e</sup>, et 75<sup>e</sup> JAS (figure 6b). Cette figure montre que ces jours ont en outre été caractérisés par des évaporations du sol globalement basses, associées à des valeurs d'humidité relative maximale plus élevées. La figure 7 illustre la variation de la part de l'évaporation du sol dans la quantité totale d'eau perdue par évapotranspiration dans la parcelle. On y constate que c'est le traitement de la faible densité (D1) et le traitement non fertilisé en urée de la forte densité (D2xN0) qui ont eu les taux d'évaporation les plus élevés, atteignant 42 à 94 % de l'ETR selon la demande évaporative et le taux de couverture végétative.



**Figure 7.** Proportions de l'évaporation du sol dans l'ETR de la variété de mil ZATIB soumise à deux densités de semis D1 (8333 poquets ha<sup>-1</sup>) et D2 (15625 poquets ha<sup>-1</sup>) et deux doses d'urée N0 (0 kg ha<sup>-1</sup>) et N1 (100 kg ha<sup>-1</sup>) pour quelques jours sélectionnés. AGRHYMET 2003.

### Efficiences d'utilisation de l'eau

Les meilleures efficacités (plus de 3 kg mm<sup>-1</sup> ha<sup>-1</sup>) de la variété ZATIB ont été observées avec la faible densité de semis, associée ou non à l'apport d'urée (tableau I). Les plus faibles efficacités ont été obtenues avec la forte densité de semis et ce en l'absence d'apport d'urée. On note cependant qu'en 2002, le traitement d'urée associé à la forte densité de semis a eu l'efficacité d'utilisation d'eau la plus élevée (4,5 kg mm<sup>-1</sup> ha<sup>-1</sup>).

**Tableau I.** Consommation hydrique, rendement grain et efficacité d'utilisation de l'eau de la variété de mil ZATIB en fonction de l'apport d'urée et de la densité de semis.

Traitement	ETR cumulée (mm)	Rendement grain (kg ha <sup>-1</sup> )	Efficacité (kg mm <sup>-1</sup> ha <sup>-1</sup> )
<b>En 2002</b>			
N0D1	357	1088 <sub>a</sub>	3.0
N1D1	332	1243 <sub>ab</sub>	3.7
N0D2	307	699 <sub>c</sub>	2.3
N1D2	321	1463 <sub>bd</sub>	4.5
<b>En 2003</b>			
N0D1	277	856 <sub>ab</sub>	3.1
N1D1	357	1134 <sub>a</sub>	3.2
N0D2	310	553 <sub>b</sub>	1.8
N1D2	367	1039 <sub>a</sub>	2.8

Les résultats suivis de la même lettre ne sont pas significativement différents au seuil de 5 %.

## Discussion

### Densité apparente et stock hydrique du sol

La valeur de densité apparente du sol déterminée et utilisée dans les calculs des différents stocks d'eau dans le sol est identique à celle obtenue par calcul à l'aide du logiciel Soilhydr à partir des données granulométriques fournies par DENIS *et al.* (1984) et par GERARD (1990). Le logiciel Soilhydr a été développé sur la base des travaux de SAXTON *et al.* (1986) et permet de caractériser les propriétés hydriques et la densité apparente d'une couche de sol en fonction de ses teneurs en sable et argile. En effet, les résultats d'analyse de sol effectuée par DENIS *et al.* (1984) dans la ferme expérimentale du Centre Régional AGRHYMET indique une proportion de sable grossier de 755 à 859 g kg<sup>-1</sup>, contre seulement 77 à 106 g kg<sup>-1</sup> pour le sable fin, 13 à 62 g kg<sup>-1</sup> pour le limon et 50 à 76 g kg<sup>-1</sup> pour l'argile.

En 2002, la première mesure d'humidité du sol a été effectuée avant le semis sur un sol qui avait déjà été humecté par un cumul pluviométrique de 142,4 mm en juin ; ce qui explique le niveau élevé des stocks d'eau au 6<sup>e</sup> JAS. Toutefois, des baisses de stock d'eau sont intervenues plus tard dans la saison, dont la plus sensible vers le 60<sup>e</sup> JAS. En effet, à partir de la 2<sup>e</sup> décennie d'août et jusqu'à la fin de la 1<sup>re</sup> décennie de septembre, les pluies étaient devenues rares et insignifiantes, ce qui a conduit à un épisode sec prolongé. Pendant cette période on a constaté une chute du stock d'eau, surtout au niveau des traitements intensifiés ; ce qui a également été rapporté par SOGODOGO et SHETTY (1991) ainsi que HERRMANN *et al.* (1994). Cependant, avec les pluies tar-

dives d'octobre 2002, les plants du traitement de la forte densité de semis ont eu des stocks hydriques plus importants dans la tranche 0-80 cm, du fait que leur consommation hydrique a été diminuée par la perte plus importante de jeunes talles qu'ils ont connu sous l'impact du déficit hydrique avant le 60<sup>e</sup> JAS.

En 2003, le cumul pluviométrique enregistré avant le semis était de 67,4 mm seulement. Cependant, le stock d'eau dans le sol a été constamment plus élevé qu'en 2002. Le seul épisode sec observé au 45<sup>e</sup> JAS n'a pas eu d'impact négatif sur la culture, parce qu'il était survenu à un moment où les plants étaient encore très petits et avaient par conséquent des besoins en eau faibles, comme attesté par DIOUF (2000). Les écarts entre les traitements d'urée et de densité de semis ont été plus grands en 2003 qu'en 2002 à causes des pluies plus régulières, ce qui a permis à l'urée d'avoir plus d'impact sur le développement de LAI, donc sur les variations du stock d'eau dans le sol que la densité de semis (AFFHOLDER, 1995 et 1997). En l'absence d'urée, le niveau du stock d'eau était plus élevé sous la forte densité D2 parce que les plants de ce traitement avaient un LAI plus faible, donc peu consommatrice d'eau comparativement à ceux de la faible densité dont le développement avait été favorisé par leur faible nombre dans la parcelle, comme indiqué dans OMM (1993). Durant toute la saison en 2003, les parcelles des deux densités de semis ayant reçu de l'urée avaient presque les mêmes niveaux de stock d'eau. Cela montre que la dose apportée a été suffisante pour permettre aux plants de la faible densité de produire assez de LAI, donc d'avoir des besoins hydriques comparables à ceux des plants semés plus denses.

Pour toutes les observations effectuées lorsque le sol était moins humide, le stock d'eau a été constamment plus bas dans les parcelles avec urée que dans celles sans urée et ce, pour les deux densités de semis. Cela montre que l'apport d'urée a augmenté la consommation hydrique, du fait du développement foliaire qu'il a provoqué (BACCI *et al.*, 1998). En effet, plus la couverture foliaire est grande, plus la consommation hydrique devient élevée, ce qui épuise rapidement la réserve en eau du sol et par conséquent rend les plants plus sensibles au stress hydrique. C'est ainsi qu'en 2002, l'effet de l'épisode sec du 70<sup>e</sup> JAS a été plus accentué chez les plants fertilisés en urée de la forte densité de semis dont la consommation en eau a plus baissé pendant la sécheresse. AFFHOLDER (1995) et DIOUF *et al.* (2004) ont abouti aux mêmes conclusions par rapport à la réponse du mil à la fertilisation azotée en situation de stress hydrique. Dans la tranche 0-80 cm du sol, les différences des stocks d'eau entre les traitements ont été plus importantes en 2003 qu'en 2002. Cela est dû au fait qu'en 2002, les racines, dont la croissance dépend du front d'humectation, ont puisé dans cette frange pendant les épisodes secs qui ont eu lieu entre le 50<sup>e</sup> et 80<sup>e</sup> JAS.

### **Evapotranspiration réelle (ETR)**

Les variations du stock d'eau en fonction des différents traitements d'urée et de densité de semis se sont répercutées sur celles de l'ETR. En effet, durant les périodes où l'alimentation en eau était normale, l'ETR était plus élevée chez les traitements intensifiés. Cependant, en situation de stress hydrique, elle était plus faible parce que les plants des traitements intensifiés, dont les besoins hydriques avaient été augmentés avant le stress, avaient épuisé plus vite le stock d'eau dans le sol, comparativement à ceux qui sont plus espacés et qui n'ont pas reçu de l'urée. DANCETTE (1991), LAOUAN (1996) et DIOUF *et al.* (2004) ont obtenu des résultats similaires, et ont indiqué que l'ETR augmente avec le développement foliaire pour diminuer progressivement avec la sénescence et l'épuisement de la réserve hydrique.

## Evaporation du sol

L'évaporation du sol a essentiellement varié avec les taux de couverture foliaire induits par les différents traitements, les plus petites valeurs ayant été observées chez les traitements fertilisés en urée aussi bien de faible que de forte densité de semis. Les valeurs d'évaporation mesurées sur le traitement D2xN0 étaient élevées en début de végétation, mais elles ont commencé à baisser à partir du 64<sup>e</sup> JAS. Cela était dû au fait que le développement foliaire des plants de ce traitement avait accusé un retard qui a par la suite été rattrapé vers la fin du cycle. Ce résultat est conforme à ceux obtenus par JARA *et al.* (1998) qui ont aussi trouvé que l'évaporation du sol diminuait progressivement avec l'augmentation du LAI.

Toutefois, nous avons également obtenu des valeurs d'évaporation plus élevées sur les micro-lysimètres placés dans les parcelles intensifiées ayant une grande couverture végétale. Cela pourrait s'expliquer par le fait que lorsque le sol est suffisamment humide, l'atmosphère se charge d'humidité et les conditions deviennent favorables à la formation de rosées nocturnes. Ces rosées, qui humidifient les lysimètres à des degrés différents selon leur couverture par la culture, peuvent augmenter le poids des lysimètres les plus exposés. Ainsi, si les mesures sont effectuées tôt le matin comme dans notre cas, l'évaporation du jour précédent peut être sous-estimée. Les mesures effectuées parallèlement sur sol nu confirment ces observations. Afin d'éviter ce genre d'erreurs, il serait plus indiqué d'effectuer les pesées des micro-lysimètres le soir, vers le coucher du soleil. Les valeurs d'évaporation obtenues pendant les jours à forte demande évaporative ont néanmoins varié dans le même sens que les ETO et ont parfois atteint 90 % de l'ETR. Cette forte proportion est due non seulement au caractère épars de la culture dans certains traitements, mais aussi à la quantité élevée de rayonnement global arrivant à la surface du sol pendant la saison pluvieuse au Sahel, comme l'ont indiqué BEGUE (1991) et AMADOU (1994).

## Efficiences d'utilisation de l'eau

La variété ZATIB a donné les meilleures efficacités d'utilisation d'eau avec la faible densité de semis, associée ou non à l'apport d'urée. Cependant, en 2002 le traitement N1xD2 a été une exception, en donnant une efficacité de 4,5 kg mm<sup>-1</sup> ha<sup>-1</sup>. Cela s'explique par le fait que les plants de ce traitement avaient un développement exubérant jusqu'en début montaison, mais, suite aux épisodes secs survenus à partir du 50<sup>e</sup> JAS, on a assisté à la mort de certaines de leurs tiges. Ainsi, à la reprise des pluies en octobre (80<sup>e</sup> JAS), ces plants qui avaient vu leurs besoins en eau diminués par rapport à ceux des autres traitements, ont pu se développer et produire plus grâce à leur nombre élevé dans la parcelle. Notons cependant que cette situation est assez exceptionnelle pour le site de Niamey, où la probabilité d'avoir un cumul pluviométrique supérieur à 10 mm n'est que de 15,6 % pour les deux premières décades d'octobre.

## Conclusion

Les résultats de notre étude ont montré que l'apport d'urée a eu un effet important sur la consommation hydrique du mil à cause de son effet sur le développement des plants. Quant à la densité de semis, son effet a été perceptible non seulement dans les parcelles n'ayant pas reçu de traitement d'urée, mais aussi dans celles l'ayant reçu dans des conditions hydriques déficitaires. Ainsi, il est important de prendre en compte la disponibilité en eau dans le choix des pratiques culturales pour une augmentation de la production du mil au Sahel. Ces résultats suggèrent qu'en pré-



vision de l'effet négatif d'un éventuel déficit en eau au cours du cycle de la culture, il serait préférable de modérer l'apport d'urée et d'adopter une densité de semis relativement faible pour une meilleure économie de l'eau. Cependant, au vu des bonnes efficacités d'utilisation de l'eau observées en 2002 avec les traitements intensifiés ayant subi un déficit hydrique pendant la période végétative, il y a lieu de poursuivre cette étude en contrôlant la disponibilité en eau aux différents stades de développement de la culture sous les mêmes traitements de densité de semis et d'apport d'urée. Cela permettrait de relativiser l'avantage apparent qu'ont eu ces traitements après une reprise inespérée des pluies en fin de saison.

## Remerciements

Cette étude a été réalisée grâce à l'appui financier de la Coopération française au Centre AGRHYMET et à la bourse de mobilité octroyée au premier auteur par l'Agence Universitaire de la Francophonie (AUF).

## Références citées

- AFFHOLDER F., 1995.** Effect of organic matter input on the water balance and yield of millet under tropical dry-land condition. *Field Crops Research* 41: 109-121.
- AFFHOLDER F., 1997.** Empirically modelling the interaction between intensification and climatic risk in semiarid regions. *Field Crops Research*. 52: 79-93.
- ALLEN R., PEREIRA L., RAES D. and SMITH M., 1998.** Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. FAO irrigation and drainage paper n°56. Rome. Italy. 301 p.
- AMADOU M., 1994.** Analyse et modélisation de l'évaporation-transpiration d'une culture de mil en région aride sahélienne. Thèse Doc. en science Univ. Paris XI ORSAY, France. 106 p.
- BACCI L., CANTINI C., PIERINI F. et MARACCHI G., 1998.** Effects of agronomics practices on growth, development and yield of a short day cultivars of millet and their agronomic consequences in Mali. In "Le futur des céréales photopériodiques pour une production durable en Afrique tropicale semi-aride " Reyniers F-N. et BACCI, L eds. Florence : p. 31-44.
- BEGUE A., 1991.** Estimation de la production primaire en zone sahélienne à partir de données radiométriques cas d'un couvert discontinu : le mil. Thèse de doc. Univ. Paris VII, France. 139 p.
- CILSS, 2002.** Sécurité alimentaire durable dans une perspective de lutte contre la pauvreté au Sahel. In "Stratégie opérationnelle régionale 2003-2005 et programme quinquennal 2003-2007". Ouagadougou, Décembre 2002.
- COULIBALY A., SOGODOGO D. et SHETTY S.V.R., 1988.** L'intensification des systèmes de culture du mil au Mali. In : Mil et Sorgho au Mali. IER/ICRISAT/USAID. 356P.
- DANCETTE C., 1976.** Mesures d'évapotranspiration potentielle et d'évaporation d'une nappe d'eau au Sénégal. Besoins en eau des cultures. *Agronomie Tropicale*, N° XXXI ; 4 -10- 1976.
- DANCETTE C., 1991.** Critique des recherches sur le bilan hydrique en zone soudano-sahélienne. In "Soil water balance in the sudano-sahelian zone" IAHS publication N°199. P. 45-62.
- DENIS J. J., PFISTER M. et GANDA A., 1984.** Suivi et production des cultures. Campagne 1983, Ferme expérimentale centre Agrhytmet. 77P.
- DE ROUW A. 2004.** Improving yields and reducing risks in pearl millet farming in the African Sahel. *Agricultural Systems* 81 : 73-93
- DIOUF O., 2000.** Réponses agrophysiologiques du mil (*pennisetum glaucum* (L.) R. Br.) à la sécheresse : influence de la nutrition azotée. Thèse Doc. en Sciences ; Université Libre de Bruxelles, Belgique. 160 P.

- DIOUF O, BROU Y.C., DIOUF M., SARR B., EYLETTERS M., ROY-MACAULEY H. et DELHAYE J.P., 2004.** Reponse of pearl millet to nitrogen as affected by water deficit. *Agronomie* 24 (2004): 77-84.
- GERARD, 1990.** L'eau et les sols dans les géosystèmes tropicaux. Collection géographique, Masson, 221P.
- HERRMANN L., HEBEL A. ET STAHR K., 1994.** Influence of soil microvariability on millet growth on sandy sahelian soils. *Z. Pflanzenernar. & Bodenk.* 157 : 111-115.
- JARA J., STOCKLE C. O. et KJELGAARD J., 1998.** Measurement of evapotranspiration and its components in a corn (*Zea Meys L.*) field. *Agric. Forest Meteor.* 92: 131-145.
- KASSAM A. H. et KOWAL J. M., 1975.** Water use, energy balance and growth of Gero millet at Samaru, Northern Nigeria. *Agric. Forest Meteorol.*, 15 : 333-342.
- LAOUAN F. Z., 1996.** Aspects agrométéorologiques de l'association mil/niébé dans l'Ouest du Niger. Mémoire d'Ingénieur en Agrométéorologie, Centre AGRYMET, Niamey, Niger. 106p.
- LAWSON T. L. et SIVAKUMAR M. V. K., 1991.** Climatic constraints to crop production and fertilizer use. *Fertilizer Research* 29: 9-20.
- MASON S. C., 2001.** Cropping systems to optimise yield, water end nutrient efficiency of pearl millet. In: INTSOR-MIL 2001 annual report: p. 49-55.
- OMM., 1993.** L'agrométéorologie du mil (*pennisetum glaucum (L) Leeke*), rapport commission de météorologie agricole (CMAg) N° 56 , OMM/ TD N° 566, Genève, septembre 1993. 124 P
- PAYNE W. A., WENDT C. W. et LASCANO R. J., 1990.** Root zone water balances of three low-input millet fields in Niger, west Africa. *Agron. J.* 82: 813-819.
- PIRAUX M.; BOCK L., BULDGEN A., LEFORT E., STEYAERT P. et DIAGNE A., 1997.** Influence des conditions climatiques, topographiques et d'intensification sur la fertilité physique et chimique des sols ferrugineux en région sahélo-soudanienne. Note originale, *Sécheresse* ; 8 (4) : 247-56.
- SAXTON K.E., RAWLS W.J., ROMBERGER J.S. et PAPENDICK R.I., 1986.** Estimating generalized soil water characteristics from texture. *Soil Sci. Soc. Amer.* 50 (4) : 1031-1036.
- SIVAKUMAR M. V. K., 1989.** Exploiting rainy season potential from the onset of rains in sahelian zone of West Africa. ICRISAT Sahelian Center, Niger. *Agricultural and Forest Meteorology*, 51 (1990) : 321-332.
- SOGODOGO D et SHETTY S. V. R., 1991.** Besoins agronomiques des géotypes de sorgho sous condition de culture pluviale au Mali. In : "Progress in food grain research and production in semi-arid Africa". MENYONGA J. M., BEZUNEH T., YAYOCK J. Y., SOMANA I. eds. Proceedings of the SAFGRAD Inter-Network Conference, Niamey, Niger, 7-14 March, 1991: 297-308.
- TRAORE A., 1988.** Quelques aspects de la fertilisation du mil et du sorgho au Mali. In *Mil et Sorgho au Mali IER/ICRISAT/USAID*. p. 237-251.
- VACHAUD G. et KLAIJ M.C., 1992.** Seasonal water balance of sandy soil in Niger, cropped with pearl millet, based on profile moisture measurements. *Agri. Mater management*, 21 : 313 – 330.