

Détermination du bilan hydrique d'un système agroforestier : cas de l'association *Gueira senegalensis* et mil (*Pennisetum glaucum*) sous deux régimes hydriques

Mame Balla NDIAYE^{1*}, Roger BAYALA², Nathaniel BOGIE³, Mouhamed Talla CISSE⁴, Ibrahima DIEDHIU⁵ et Soussou SAMBOU¹

¹ Université Cheikh Anta Diop, Département de Physique, Laboratoire d'Hydraulique et de Mécanique des Fluides, Dakar, Sénégal

² Université de Jean Lourougnon Guédé, Département de Science du Sol, Daloa, Côte d'Ivoire

³ Université de San José, Département de Géologie, Californie, USA

⁴ Université Iba Der Thiam de Thiès, UFR Sciences et Technologies, Thiès, Sénégal

⁵ Université Iba Der Thiam, École Nationale Supérieure de l'Agriculture, Thiès, Sénégal

(Reçu le 04 Décembre 2022 ; Accepté le 02 Février 2023)

* Correspondance, courriel : ndiayeballa@outlook.fr

Résumé

Dans le Nord du bassin arachidier sénégalais le *Gueira Senegalensis* est un arbuste qui coexiste avec les cultures. Sa présence joue un rôle important sur la croissance et le rendement des cultures. L'objectif de cette étude est de faire le bilan des consommations hydriques des cultures (ETR) associés et non-associés à l'arbuste avec la méthode du bilan de masse et avec la méthode de Penmann-Monteith pour étudier d'une part l'effet de sa présence sur la dynamique de l'eau dans la zone racinaire des cultures et d'autre part leur effet sur le ETR en condition de déficit hydrique. Quatre traitements sont comparés dans cet essai : Présence d'Arbustes Non Stressé (PANS), Présence d'Arbustes Stressé (PAS), Sans Arbustes Non Stressé (SANS) et Sans Arbustes Stressé (SAS). Cette association a un effet significatif sur la dynamique de l'eau dans la zone racinaire du mil et sur son développement : en maintenant le maximum d'eau dans cette zone, au détriment du drainage profond. L'association n'a pas d'effet significatif sur le ETR en condition non-limitante d'apport hydrique mais en conditions d'apport limitant, les cultures associées ont un ETR supérieur aux cultures non associées. Ce système est à valoriser pour améliorer la productivité et augmenter le degré de tolérance et de survie des cultures lors d'une période de déficit en zones semi-arides.

Mots-clés : bilan hydrique des cultures, *Gueira*, stress hydrique, ETR.

Abstract

Soil water balance of agroforestry system : Case of *Gueira Senegalensis*-millet intercropping (*Pennisetum glaucum*) under two water regimes

In the northern part of the Senegalese groundnut basin, *Gueira Senegalensis* is a shrub that coexists with crops. Its presence plays an essential role in the growth and yield of crops. The objective of this study is to assess the water consumption of crops (ETR) associated and not associated with the shrub using the mass

balance method and the Penmann-Monteith method in order to study the effect of its presence on the water dynamics in the root zone of crops and their impact on the ETR under water deficit conditions. Four treatments are compared in this trial: The Presence of Shrubs and No Stress (PANS), Presence of Shrubs and Stressed (PAS), No Shrubs and No Stress (SANS), and No Shrubs-Stressed (SAS). This association has a significant effect on water dynamics in the millet root zone and on its development : it maintains a maximum amount of water in this zone, at the expense of deep drainage. The association does not have a significant effect on the ETR under non-limiting water supply conditions. Still, under limited water supply conditions, the associated crops have a higher ETR than non-associated crops. This system can be used to improve productivity and increase the tolerance and survival of crops during a period of water deficit in semi-arid zones.

Keywords : *soil water balance, Gueira senegalensis, Crop water stress, ETR.*

1. Introduction

Depuis quelques décennies, le Sénégal, comme l'ensemble des pays sahéliens, est caractérisé par des conditions agroclimatiques défavorables, marquée par une pluviométrie irrégulière et déficitaire. Ce déficit hydrique dans le sahel entrave la disponibilité de l'eau dans la zone racinaire des cultures [1]. Du fait de la poussée démographique et de la diminution des surfaces cultivables dans le bassin arachidier, les cultivateurs ont abandonné les systèmes de culture traditionnels intégrant la jachère, ce qui a entraîné une dégradation progressive de la fertilité des sols. Le déficit hydrique pour les cultures et la diminution de la fertilité des sols sont les principales causes de la faible productivité dans cette zone. Dans ces conditions, l'amélioration de la fertilité des sols et la gestion rationnelle des ressources en eau pour restaurer la productivité des terres agricoles deviennent une nécessité si l'on veut réduire l'insécurité alimentaire [2]. Il est nécessaire d'envisager de nouvelles techniques de cultures pour améliorer la production et réduire la pauvreté dans ces zones semi-arides. Le système d'agroforesterie consistant à associer les cultures à des arbres ou arbustes semble être un moyen efficace. Ce système présente plusieurs avantages, l'association arbustes- cultures peut accroître l'efficacité de l'utilisation de l'eau de pluie ou d'irrigation par les cultures, mais aussi augmenter l'efficience hydrique des cultures en modifiant les conditions microclimatiques [3]. Dans les champs du nord du bassin arachidier, le mil et l'arachide, qui sont les principales cultures saisonnières, sont cultivés avec le *Guiera senegalensis*.

Cet arbuste se retrouve à des degrés divers en tant que partie intégrante des systèmes de culture. Au-delà de son rôle de fixateur du sol contre l'érosion éolienne, cet arbuste contribue au maintien de la fertilité des sols [4]. Sur le plan environnemental [5] rapporte que la présence du Guiera a un fort impact sur la séquestration du carbone au niveau régional. Par ailleurs, il a été montré que la présence de cet arbuste améliore la disponibilité en eau pour les cultures qui sont associées [4]. A cet effet, des études sur bilan hydrique ont été menées en conditions pluviales. Mais l'abondance de la pluie qui avait entraîné un drainage au-delà de la zone racinaire a été une contrainte dans le calcul. Afin de mieux déterminer les besoins en eau du mil et de l'arachide, cet essai a été mis en place dans des conditions où les apports hydriques sont contrôlés. Ainsi pour mieux comprendre les effets de l'association Guiera-mil, la pratique d'un bilan hydrique du sol est indispensable pour apprécier l'impact de l'association Guiera-mil sur la consommation hydrique des cultures, sur la dynamique de l'eau du sol et le rendement du mil, mais aussi d'élucider leurs effets sur les cultures lors d'une période déficit hydrique. L'objectif de ce travail est de déterminer les effets de la présence du Gueira sur la consommation hydrique des cultures. D'une manière plus spécifique, il s'agira de caractériser la dynamique de l'eau du sol dans les parcelles avec association et sans association avec du Gueira, d'effectuer le bilan hydrique du sol par la méthode de Penmann et par la méthode du bilan de masse et les comparer.

2. Matériel et méthodes

2-1. Présentation du site

L'essai a été fait dans le nord du bassin arachidier du Sénégal (Afrique de l'ouest) qui fait partie de la zone semi-aride, marquée par une saison sèche (Octobre - Juin) et une saison pluvieuse (Juillet - Septembre). Cette zone est caractérisée par une mauvaise répartition pluviométrique, généralement on observe des pluies intenses mais qui sont de faibles durées et des sécheresses épisodiques, qui entraînent des échecs de récolte fréquents [4]. Le site expérimental est situé à Keur Matar Arame, dans la région de Thiès, plus précisément dans la communauté rurale de Fandéne (**Figure 1**).

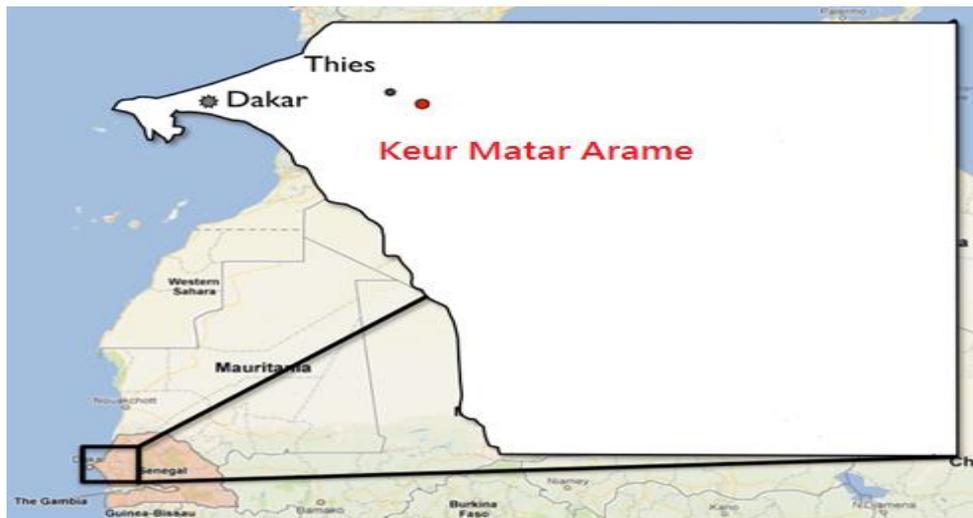


Figure 1 : Localisation de keur Matar Arame

Le site de Keur Matar Arame est caractérisé par une température minimale moyenne annuelle qui varie autour de 20°C et qui peut atteindre une maximale moyenne annuelle de 33°C, l'humidité relative est plus élevée en saison humide qu'en saison sèche variant de 91 à 27 %. La pluviométrie moyenne annuelle est de 450 mm, la pluviométrie annuelle enregistrée au niveau du site était 300 mm, 560, 303 et 578 mm respectivement pour les années 2004, 2005, 2006 et 2007 [6]. Le sol à Keur Matar est un sol sableux, classé comme Oxisol (FAO, 1998), localement le sol est appelé « Sol Dior ». Sa composition granulométrique est de 88,2 % de sable ; 6,8 % de limon et 5 % d'argile [4]. Le pH moyen du sol est de 5,8 tandis la teneur en matières organiques est de 2,9g.kg⁻¹. Le premier horizon (0-70 cm) est sableux et friable avec une faible quantité d'argile (< 5%) et une faible teneur en matières organiques. Le nord du bassin arachidier est caractérisé par une dominance du *Guiera senegalensis* avec une densité 240 arbustes à l'hectare. Les deux principales cultures dans cette région sont le mil (*Pennisetum glaucum*) et l'arachide (*Arachis hypogea*), on y cultive aussi le sorgho (*Sorghum bicolor*), le niébé (*Vigna Unguiculata*) et le maïs (*Zea mays*) surtout dans la partie sud.

2-2. Matériel

Les paramètres climatiques tels que la radiation nette, la température de l'air, la vitesse du vent, l'humidité relative ont été mesurés avec une station météorologique installée sur le site. Les mesures sont faites toutes les 15 minutes par un enregistreur de données (data-logger) de type *Campbell CR1000*. Le suivi de l'humidité du sol est un facteur important dans une étude du bilan hydrique. L'humidimètre ou la sonde utilisé pour le suivi de l'humidité dans la zone racinaire des cultures est du type DELTA-T PR2/6. Cette sonde mesure la teneur en eau du sol pour six niveaux de profondeurs différentes (10, 20, 30, 40, 60 et 100 cm). Elle utilise la

technologie de la capacité d'un condensateur d'où son nom de sonde à capacitance. Le matériel végétal était constitué du mil qui est l'une des cultures de base de la région et le *Gueira Senegalensis*. La variété de mil utilisée est le souna III qui est une plante rustique, peu exigeante du point de vue de la fertilité mais sensible au type de sol.

2-3. Méthodes

2-3-1. Dispositif expérimental et Conduite de culture

Le plan expérimental est du type split-plot à deux facteurs : l'arbuste et le régime hydrique. Le facteur arbuste est constitué de deux modalités ; la présence et l'absence d'arbustes et le facteur régime hydrique constitué de deux modalités aussi ; stress hydrique et non-stress hydrique. Après combinaison de ces facteurs et modalités, les quatre traitements suivants ont été obtenus : Parcelle avec arbustes non stressée (PANS), Parcelle avec arbustes stressée (PAS), Parcelle sans arbustes non stressée (SANS) et Parcelle sans arbustes stressée (SAS). Le sarclage et le piquetage ont été effectués une semaine avant le semis. Le mil a été semé le 07 mars et récolté le 10 Juin 2014, soit une durée de 95 jours. Les mesures de l'humidité du sol étaient quotidiennes et à deux reprises avant et après irrigation. Un suivi de la phénologie du mil a été fait pour déterminer les dates de tallage, de montaison, d'épiaison et de floraison. Un suivi des paramètres agromorphologiques tels que la hauteur des plantes, le nombre de feuilles a été effectué pendant la phase végétative.

2-3-2. Bilan hydrique des cultures

Le bilan hydrique des cultures a été fait à partir de la méthode de bilan de masse (**Figure 2**) et aussi à partir de la formule de Penman-Monteith [7]. L'essai a été fait en contre saison chaude pour bien équilibrer les apports par irrigation par rapport aux besoins de la plante mais aussi de rendre le stress hydrique sévère, par rapport aux types que l'on rencontre pendant la saison des pluies dans le sahel. Les apports sont constitués par l'irrigation et les pertes sont constituées par la combinaison de l'évaporation du sol et de la transpiration des plantes désignés sous le terme d'évapotranspiration, aussi du drainage au-delà de la zone racinaire.

2-3-2-1. Méthode du bilan de conservation de la masse

D'après la formule de la conservation de la masse, l'évapotranspiration réelle au cours de l'essai ou consommation de la plante est donnée par la **Formule** suivante :

$$ET_c = P + I + Ca + R + DD \mp \Delta S \quad (1)$$

P + I : Les précipitations et irrigation (en mm)

Ca : La condensation atmosphérique (en mm); ce terme est ignoré dans le bilan (négligé dans des environnements semi-arides)

R : Le ruissellement à la surface (en mm)

DD : La percolation (en mm); représentant l'infiltration en profondeur (vers la nappe)

ET_c : Evapotranspiration réelle (en mm)

ΔS_e : Variation de stock de l'eau (en mm)

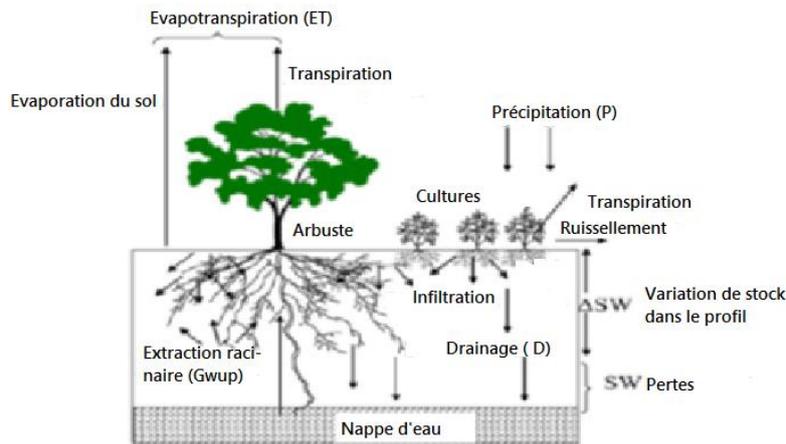


Figure 2 : Image illustrant le bilan hydrique par la méthode du bilan de masse (source Kizito et al., 2007)

2-3-2-1-1. L'irrigation (I)

Les apports hydriques ont été effectués par un système d'irrigation goutte à goutte muni de compteurs. Ainsi les apports en eau ont été déterminés et maîtrisés à chaque irrigation.

2-3-2-1-2. Variation de stock hydrique (ΔS)

Le stock hydrique du sol entre deux niveaux de profondeurs différents, représente la quantité d'eau contenue dans cette tranche de sol. Le stock peut être déterminé par la **Formule** suivante où $\theta(z)$ représente l'humidité du sol en cette profondeur.

$$S = \int_0^z \theta(z) dz \tag{2}$$

La variation de stock hydrique ΔS est définie comme étant la différence de stock hydrique entre deux dates.

2-3-2-1-3. Drainage en profondeur (DD)

Le drainage en profondeur DD est le mouvement vertical de l'eau du sol au-delà de la zone racinaire des plantes [4]. Quand la teneur en eau du sol atteint la capacité au champ, l'eau est drainée dans le sol et peut devenir une potentielle de recharge de la nappe. La capacité au champ est la teneur en eau volumique qui correspond à la capacité maximale de rétention d'eau dans le sol. Dans ce travail nous avons considéré le drainage comme le flux d'eau au-delà de 2 mètres qui est la limite maximale de la profondeur que peut atteindre les racines du mil de souba III. L'estimation du drainage est faite en utilisant la loi de Darcy généralisée (**Équation 3**) qui donne le flux d'eau Q qui traverse une surface S en fonction de la conductivité hydraulique $K(\theta)$ du sol et du gradient de la charge hydraulique H . Le flux d'eau traversant la surface du sol à la limite de la zone racinaire est donné par la relation suivante :

$$Q = - K(\theta)S \frac{\partial H}{\partial z} \tag{3}$$

avec, $K(\theta)$: conductivité hydraulique du sol, S : section, $\frac{\partial H}{\partial z}$: gradient de charge hydraulique

La densité de flux q (c'est à dire le flux hydrique à travers une section élémentaire) est donné par la relation :

$$q = -K(\theta) \frac{\partial H}{\partial z} \quad (4)$$

La charge hydraulique est donnée par $H = h(\theta) - z$, tels que $h(\theta)$ est la charge matricielle et z la charge gravitaire. A la limite de la zone racinaire, c'est à dire à la profondeur $z = 2m$, l'écoulement est gravitaire donc $H = -z$ on obtient donc $\frac{\partial H}{\partial z} = -1$ (hypothèse du gradient unitaire). On obtient finalement la densité de flux hydrique qui est donnée par :

$$q = K(\theta) \quad (5)$$

La détermination de la conductivité hydraulique est faite avec la **Formule** de Mualem et Van-genuchten [8, 9] donnée par la **Relation** suivante :

$$K(\theta) = K_s \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right) \left[1 - \left(1 - \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{\frac{1}{m}} \right)^m \right]^2 \quad (6)$$

Cette **Formule** exprime la conductivité hydraulique K en fonction de la teneur hydrique θ du sol.

avec, K_s : conductivité hydraulique à saturation

θ_r : Teneur en eau résiduelle du sol

θ_s : Teneur en eau à la saturation du sol

m : Constante du sol; $m = 1 - \frac{1}{n}$ (7)

2-3-2-2. Bilan hydrique déterminé par la formule de Penmann Monteith

2-3-2-2-1. Détermination de l'évapotranspiration de référence (ET_0)

L'évapotranspiration de référence ET_0 constitue l'ensemble des pertes en eau par évaporation et par évapotranspiration d'une surface de gazons de hauteur uniforme, couvrant totalement le terrain, en pleine période de croissance, recouvrant complètement le sol et abondamment pourvue d'eau. L'évapotranspiration de référence a été introduit pour étudier la demande évapotiv de l'atmosphère indépendamment du type de culture, du stade de développement des cultures, et des pratiques culturales. La méthode de Penman-Monteith a été utilisée pour estimer l'évapotranspiration de référence des cultures. On le calcule à partir des données météo (Radiation nette du soleil, la température de l'air, l'humidité relative et la vitesse du vent). La **Formule** de l'évapotranspiration de référence horaire d'après Penmann est donnée par la **Relation** suivante :

$$ET_0 = \frac{0,408\Delta(Rn-G) + \gamma \frac{37}{Thr+273} u_2 (e^0(Thr) - e_a)}{\Delta + \gamma(1+0,34*v)} \quad (8)$$

2-3-2-2-2. Évapotranspiration standard ou maximale (ET_C)

L'évapotranspiration standard d'une culture donnée est déterminée à différentes stades de son développement, et est définie comme étant l'ensemble des pertes en eau par évaporation et par transpiration lorsque l'eau est en quantité suffisante et que les conditions agronomiques sont optimales (c'est-à-dire des cultures bien fertilisés, cultivés dans de grands champs, ayant une bonne gestion et des conditions environnementales excellentes, donnant une bonne production dans des conditions climatiques données). Les effets des caractéristiques culturales dans le calcul de l'évapotranspiration sont tenus en

compte dans le terme appelé coefficient de culture K_C , de ce fait, l'évapotranspiration standard ET_C s'obtient en multipliant ET_0 par K_C

$$ET_C = K_C * ET_0 \tag{9}$$

avec K_C : coefficient cultural, grandeur sans dimension.

K_C est un coefficient qui permet de corriger l'évapotranspiration de référence en tenant compte des caractéristiques des cultures (type de culture, stade de développement, phénologie etc).

2-3-2-2-3. Évapotranspiration réelle (ET_R)

Les forces capillaires qui agissent sur l'eau du sol diminuent son énergie potentielle et le rend moins disponibles pour l'extraction des racines des plantes. Lorsque le sol est mouillé, l'eau a une énergie potentielle élevée, est relativement libre de se déplacer et est facilement absorbée par les racines. Dans les sols secs l'eau a une énergie potentielle faible et est fortement liée au sol par les forces capillaires et d'absorption de la matrice du sol et devient difficile à l'extraction par les racines. Lorsque l'énergie potentielle de l'eau du sol est inférieure à une valeur seuil, les cultures entrent en stress hydrique et diminuent leur taux de transpiration et d'évapotranspiration. Pour tenir en compte des effets du stress sur l'évapotranspiration, il sera nécessaire de corriger l' ET_C en le multipliant par un coefficient correctif K_S , appelé coefficient de stress hydrique. On a :

$$ET_R = K_S * ET_C = K_S * K_C * ET_0 \tag{10}$$

Le coefficient de stress n'a été tenu en compte dans le calcul de l'évapotranspiration que dans les parcelles stressées. Pour les parcelles non-stressées, l'évapotranspiration reste toujours maximale. Le coefficient de stress K_S est donné par la **Formule** suivante :

$$K_S = \frac{RU - D_r}{RU - RFU} \tag{11}$$

RU : réserve utile ; RFU : réserve facilement utilisable ; D_r : Déplétion ou épuisement du sol dans la zone racinaire.

3. Résultats

3-1. Irrigation

Les apports en eau ont été faites par irrigation avec un système goutte à goutte. Le mil a été semé le 7 Mars 2018, après un apport de 26 mm (pluie de semis) d'eau dans le sol. Ensuite l'irrigation a été effectuée quotidiennement avec la même quantité dans chaque parcelle. Mais dans les parcelles stressées, elle a été suspendue le 14 Mai au stade de mi- saison soit au 67 ème jour après semis. Les parcelles non-stressées et stressées ont reçu au total 425 et 274 mm respectivement.

3-2. Évolution des paramètres climatiques

La **Figure 3** montre l'évolution journalière des paramètres climatiques tels que la température de l'air, l'humidité relative, la rayonnement net et la vitesse du vent durant l'essai. La température moyenne journalière a varié entre 19 et 30°C. A partir du 4 Mai, elle n'a cessé de croître jusqu'à la date de récolte,

période idéale pour mettre les plantes en situation de stress hydrique. On a enregistré une humidité moyenne journalière maximale de 75 % et une valeur minimale de 20 %. Du 7 Mars (date de semis) au 1^{er} Mai, les valeurs de l'humidité relative enregistrées étaient très instable tendant à une diminution et correspondaient aux phases de levée et de végétation des cultures. Du 1^{er} Mai jusqu'à la récolte, il y'a eu de faibles fluctuations de l'humidité relative autour d'une valeur de 65 %. Pendant toute la durée de l'essai la vitesse du vent tournait autour de 2 à 4 m/s. Pour le rayonnement net, il a varié entre 50 à 150 W.m⁻². Les valeurs moyennes journalières les plus faibles ont été observées en début de cycle entre le semis et le 16^{ème} jas.

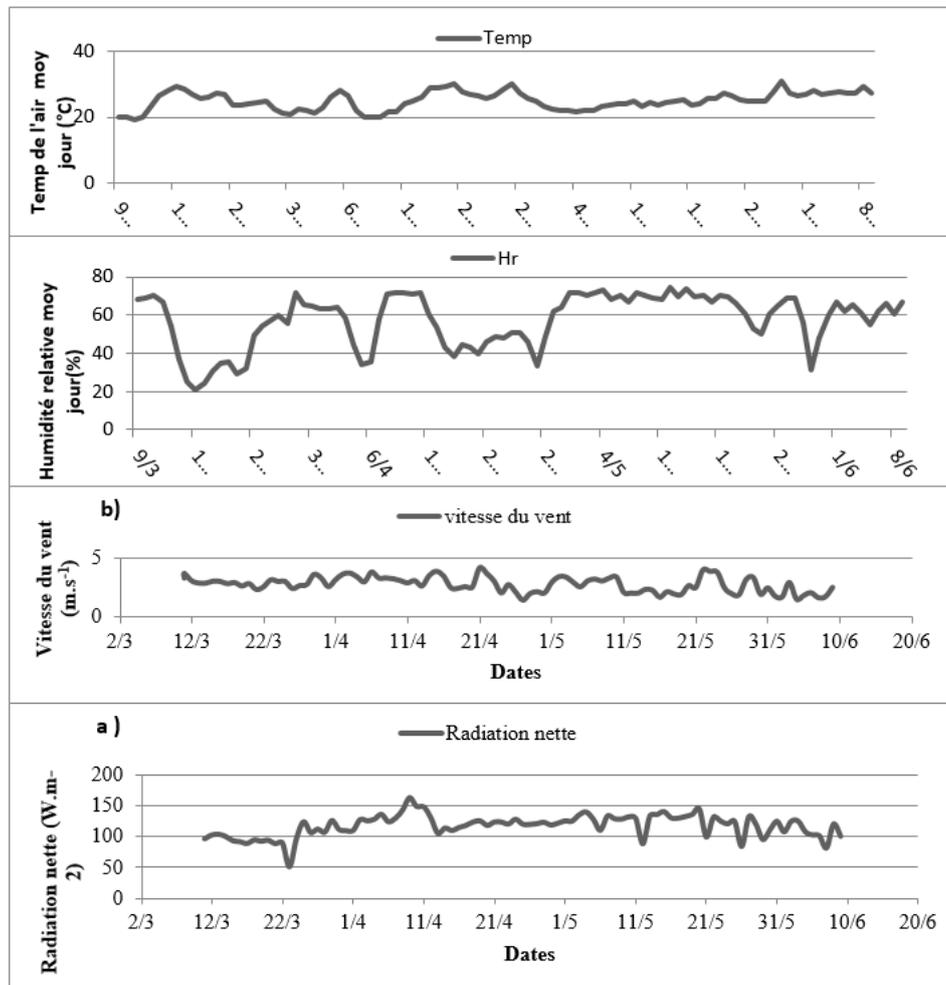


Figure 3 : Évolution des paramètres climatiques durant l'essai

3-3. Évolution des profils hydriques au cours du cycle

Le suivi de la dynamique de l'eau dans la zone racinaire était fait par la méthode de gravimétrie. Le sol était prélevé par carottage sur différentes profondeurs et l'humidité du sol étaient déterminées par gravimétrie sur les différents traitements. La **Figure 4** présente les profils hydriques faites à trois dates au cours du développement du mil sur les différents traitements. Les humidités ont été déterminées sur des profondeurs allant de 10 cm à 2 m à partir de la surface du sol. L'analyse des résultats montre que l'humidité du sol a variée en fonction de l'irrigation.

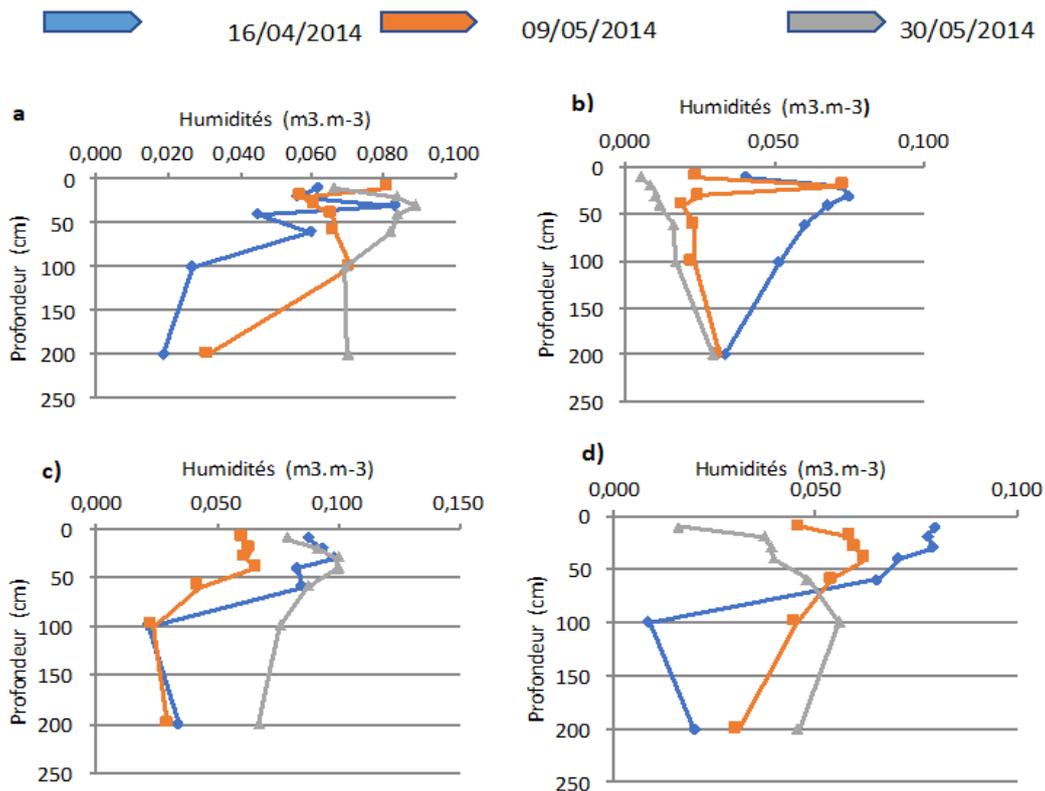


Figure 4 : *Évolution des profils hydriques par gravimétrie durant la période de l'essai sur les quatre traitements (a : PANS, b : PAS, c : SANS et d : SAS)*

Les premiers prélèvements des échantillons de sol ont été faites le 16 Avril soit 40 jours après semis avec un cumul d'irrigation de 175,9 mm. Les profils hydriques obtenus (en bleu) montrent que le front d'humectation n'avait pas encore atteint l'horizon 1m sur les traitements PANS, SANS et SAS. Sur l'horizon 2 mètres, on n'observe pas de différence de teneur en eau volumique sur tous les traitements $0,02 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$, l'eau n'avait pas atteint aussi cette profondeur. Les quantités d'eau apportées à l'irrigation étaient faites de sorte à maintenir une certaine valeur de teneur en eau dans la zone racinaire. C'était fait en fonction des besoins hydriques des cultures. Les résultats des échantillonnages effectués le 09 Mai soit 63 jours après semis (profils hydriques en orange) révèlent une diminution de l'humidité du sol sur tout le profil jusqu'à la profondeur 2m sur le traitement PAS, due à la consommation hydrique combinée des cultures et des arbustes. Par contre la diminution observée à cette même date sur les traitements sans arbustes se limite à l'horizon de 01 mètre. Les profils obtenus à cette date aussi révèlent l'effet de la présence des arbustes sur l'épuisement du stock hydrique dans tout profil racinaire des cultures. Toujours au 63^{ème} jour après semis, on constate que le front d'humectation n'a pas atteint la profondeur de 2m (limite de la zone racinaire) sur les traitements PAS et SANS mais sur les traitements PANS et SAS, on observe un léger écartement entre les profils à la même profondeur. Les profils d'humidité observés à cette date révèlent un épuisement du sol entre les horizons 20 et 60 cm sur tous les traitements. Ce qui dénote une forte consommation hydrique du mil, correspondant à la phase de développement des cultures. Des relevés gravimétriques effectués le 30 mai au 84^{ème} jour après semis et correspondant au 16^{ème} jour après imposition du stress hydrique ; profils hydriques (en gris) obtenus montrent une diminution du stock hydrique dans tout le profil du sol sur les traitements stressés PAS et SAS. Comme observé sur les profils obtenus le 09 mai, l'épuisement du stock s'est fait dans tout le profil du sol jusqu'à l'horizon de 2m sur le traitement PAS et dans les premiers horizons au-dessus de 1 m sur le traitement SAS. Par contre, sur les traitements non-stressés les profils obtenus s'écartent considérablement de ceux obtenus à la date précédente attestant une bonne disponibilité de l'eau

dans le sol 16 jour après stress. Le front d'humectation sur le traitement PAS n'a pas atteint la profondeur de 2m. Par contre sur les autres traitements, l'humidité du sol à la profondeur a subi une variation positive c'est-à-dire qu'une certaine quantité d'eau a franchi la limite de la zone racinaire du mil attestant un drainage en profondeur.

3-4. Comparaison entre ET_o et ET_r

La **Figure 5** montre la comparaison des valeurs journalières de l'évapotranspiration de référence (ET_o) et d'évapotranspiration réelle (ET_r , consommation hydrique des cultures). La comparaison est faite sur tous les traitements. Les valeurs de l' ET_o journaliers sont comprises entre 3,8 et 7,2 mm/j. Vers la fin du cycle, on constate que le ET_o diminue et se stabilise autour d'une valeur inférieure à 5mm/j. Cette situation se reflète au niveau des courbes de la radiation nette et de l'humidité relative en fin de cycle (**Figure 5a**). On note aussi des fluctuations tendant à la diminution de la vitesse du vent (**Figure 5b**). L'évolution de l' ET_r *jour* permet de suivre l'intensité des pertes hydriques journalières de la culture due à la demande atmosphérique. Du stade de levée jusqu'à la fin de la phase végétative (Tallage, montaison), l'évapotranspiration réelle représentée par le ET_r était ascendant et était en dessous du ET_o , car les cultures en croissance émettent plus de biomasse et augmentent leur besoin en eau pour transpirer. Après la phase végétative, la consommation hydrique des cultures était égale, voire légèrement supérieurs à la demande évaporative correspondant aux stades de floraison et de remplissage des grains. Dans les parcelles non stressées PANS (a) et SANS (c), à partir de la fin du stade de développement jusqu'à l'étape pré-récolte (03 juin), l' ET_r est presque égale à l' ET_o , sauf au stade de senescence des cultures où les besoins en eau sont quasiment réduits, on constate que le ET_r diminue. Sur les traitements stressés (**Figure 5B et 5D**), la courbe de l' ET_r reste presque toujours en dessous de la courbe de l' ET_o . Mais en comparant les traitements PAS et SAS, on constate que pour la culture les besoins en eau ont été plus satisfaits sur le traitement sans arbuste que sur le traitement avec arbustes. La courbe de l' ET_r sur les traitements stressés a décliné de manière plus abrupte sur le traitement avec arbuste que sur le traitement sans arbuste.

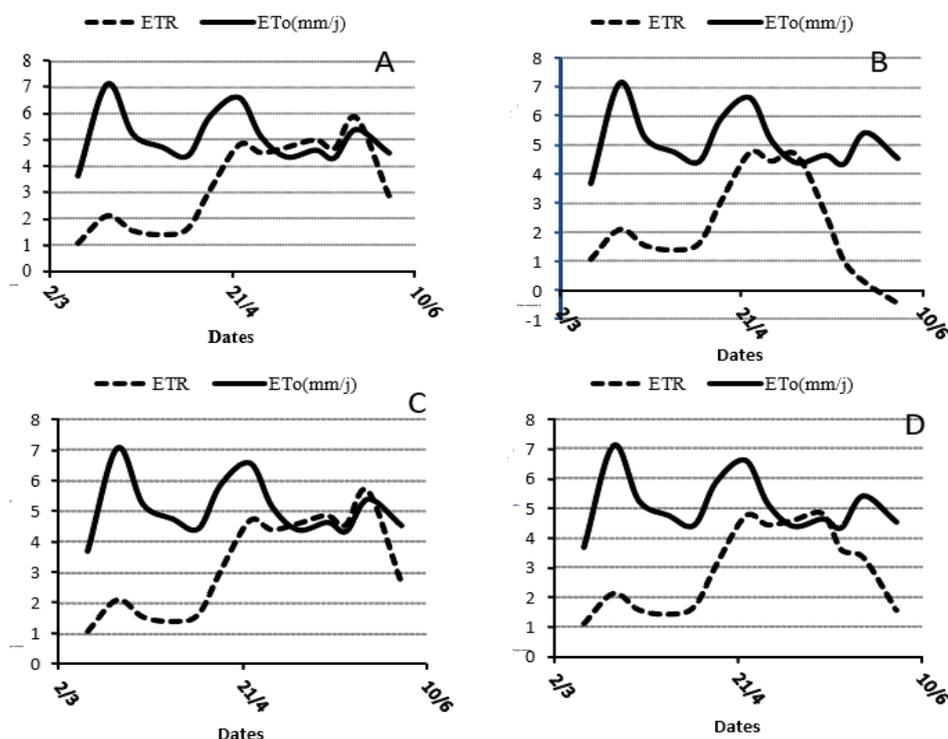


Figure 5 : Comparaison des évapotranspirations de référence ET_o , et évapotranspiration réelle ET_r sur chaque traitement durant l'essai (A : PANS, B : PAS, C : SANS, D : SAS)

3-5. Comparaison des consommations hydriques (ETR) déterminées par le bilan hydrique et par le modèle de Penmann Monteith

Dans l'*Équation* du bilan hydrique, la détermination des composantes R (ruissellement) DD (drainage) est difficile et complexe. Dans cette étude le ruissellement a été négligé pour deux raisons. Le dispositif d'irrigation goutte à goutte sur sol sableux et l'aspect plat du terrain qui n'ont pas occasionnés de ruissellement. Certes on a observé un drainage à partir du détachement des profils hydriques à 2 m, mais la méthode utilisée pour le calcul du drainage donne des quantités d'eau drainées très faibles sur certains traitements et même nulles pour d'autres. De ce fait les pertes d'eau par drainage ont été négligées dans le calcul de l'ETR par le bilan hydrique (ETR calculé). L'*Équation* du bilan hydrique est devenue alors :

$$ETR = I - \Delta S \quad (12)$$

La *Figure 6* montre la comparaison des consommations hydriques journalières des plantes (ETR) évaluées à partir du modèle de FAO-Penmann (ETR model) et celle du bilan hydrique (ETR calculée). Les valeurs des ETR model et ETR calcul sont affectées chacune à leur écart-type. Les résultats montrent que les valeurs de l'ETR obtenues avec le modèle ont varié entre 1,1 et 5,8 mm par jour pour les traitements PANS, SANS et SAS et entre 1,1 et 4,5 mm par jour pour le traitement PAS. On constate aussi qu'avant le stress, il n'y a pas de grandes différences entre les valeurs de l'ETR model pour les différents traitements à chaque date. En début de cycle, l'ETR calculé par le bilan hydrique surestime l'évapotranspiration dans les quatre traitements et la sous-estime pendant la phase de développement des cultures. Entre le 25 Mars et le 02 Avril, l'ETR model a diminué car dans cette période la courbe de l'humidité relative journalière a atteint un maximum de 72 %. Par contre on voit que le bilan hydrique surestime l'évapotranspiration. Dans les parcelles non stressées pendant la phase de floraison et de remplissage des grains, l'ETR model journalière a augmenté et atteint presque 6 mm/j. Tandis que dans les stressées nous notons une diminution atteignant 3 mm sur les SA et 0,5 mm sur les PA, à cause de la limitation sur la disponibilité en eau. A la fin du cycle, sur le PAS (*Figure 6-b*), on constate que l'ETR model diminue considérablement jusqu'à atteindre une valeur négative ce qui n'est pas prévisible. Mais on peut l'expliquer par le fait que le coefficient de stress qui rendait compte du degré de stress à chaque date montre que les cultures qui étaient dans ces parcelles ont atteint un degré de stress hydrique très sévère, les humidités mesurées à cette date (profil en vert) ont atteints la teneur au point de flétrissement (0,02-0,07 m³.m⁻³). A la fin du cycle, l'ETR model diminue dans les quatre traitements. L'Etr calculé augmente sur les traitements non-stressés et diminue sur les traitements stressés.

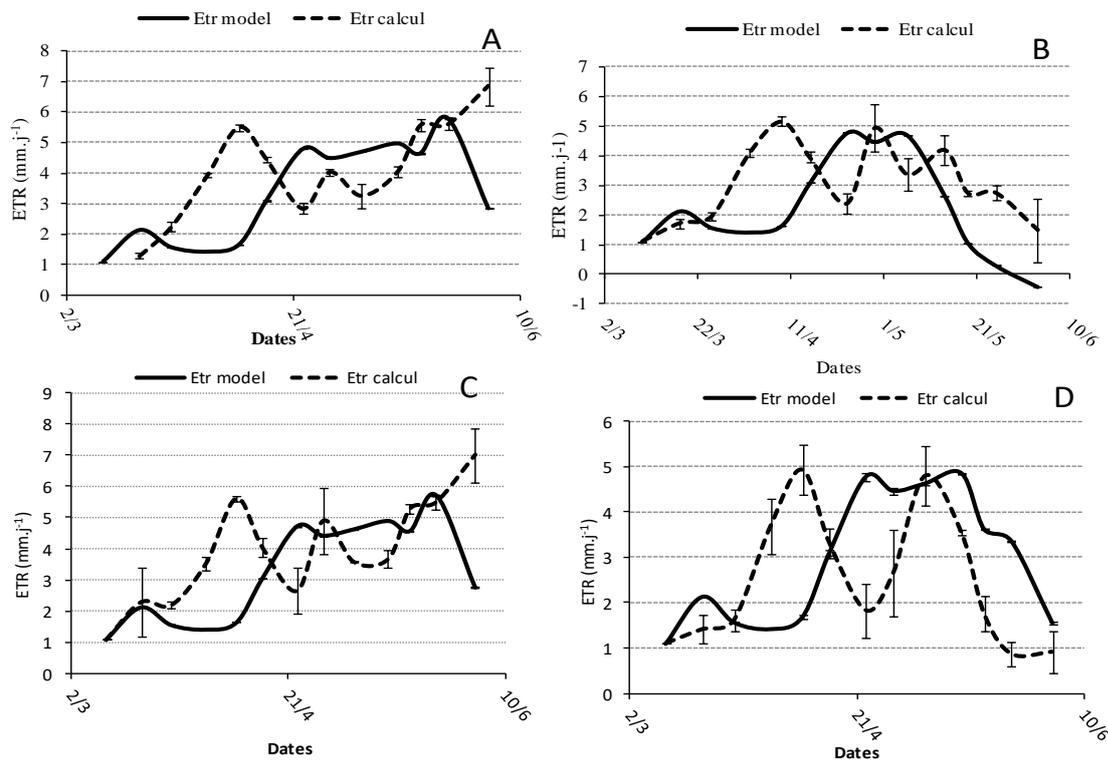


Figure 6 : Comparaison des consommations hydriques évaluées par la méthode du bilan de conservation de la masse et celle de Penman dans les différents traitements

3-6. Consommations hydriques (*ETR* calculé)

Le **Tableau 1** donne un récapitulatif de la quantité d'eau consommée par les cultures en millimètres (mm) sur chaque traitement avant le stress et à l'étape de pré-récolte.

Tableau 1 : Consommations hydriques cumulées des traitements (en mm)

Traitements	PANS	PAS	SANS	SAS
Avant. Stress	224,8 $\bar{\pm}$ 1,37	227,1 $\bar{\pm}$ 2,97	230,8 $\bar{\pm}$ 3,91	200,2 $\bar{\pm}$ 4,28
Etape pré-récolte	347,6 $\bar{\pm}$ 2,36	272,1 $\bar{\pm}$ 4,40	353,1 $\bar{\pm}$ 5,13	222,4 $\bar{\pm}$ 5,40

Ce **Tableau** montre qu'avant le stress, la consommation hydrique a été presque la même sur les traitements PANS, PAS et SANS et tournait autour de 227 mm, par contre sur le traitement SAS elle est égale à 200 mm. A l'étape pré-récolte la consommation hydrique est plus importante sur le traitement SANS que sur celui de PANS avec une différence de 6 mm. Au niveau des traitements stressés, l'arrêt de l'irrigation a eu des effets sur la consommation hydriques de cultures. Mais le traitement PAS bien que stressé a une consommation plus importante que le traitement SAS. Mais l'effet de la présence de l'arbuste n'est pas marqué sur les traitements non stressés.

4. Discussion

4-1. Dynamique de l'eau dans la zone racinaire des cultures

Au cours de l'expérimentation, les conditions globales de croissance et de développement des cultures ont été satisfaisantes. La quantité d'eau apportée dans les parcelles non stressées a été suffisante pour couvrir les besoins en eau du mil. Les besoins en eau du mil souba III peuvent être estimés à 420 mm [10]. Le stock hydrique du sol entre la surface jusqu'à une profondeur de 1m est plus important sur les traitements avec arbustes que sur les traitements sans arbustes. Et c'est le contraire qui est observé à partir de 1m vers les horizons plus profonds. En effet, il n'existe pas d'effet de compétition sur les ressources hydriques entre l'arbuste et la culture sur une profondeur de 1m, car les racines des arbustes puisent de l'eau dans les horizons en dessous de 1m [6]. L'épuisement du stock hydrique entre les horizons 1m à 1,75 m dans les parcelles avec arbustes traduirait l'effet combiné du mil et de l'arbuste. En effet cette zone est la zone de prospection des racines des arbustes. Les racines du mil puisent l'eau nécessaire pour leur développement entre les horizons 20 et 100 cm tandis que 95 % des racines des arbustes puisent au-delà de 50 cm [4]. Le front d'humectation descend beaucoup plus vite sur les parcelles sans arbustes que sur les parcelles avec arbustes. Les mesures d'infiltration faites à Keur Matar Arame ont montrés que l'infiltrabilité était à 75 % plus importante dans les traitements sans arbustes que ceux avec arbustes[9]. La différence sur la dynamique de l'eau du sol observée sur les traitements avec arbustes et sans arbustes, pourrait être expliquée par la forte quantité de la matière organique qui est mesurée sur la zone entourant l'arbuste. Des études antérieures ont montrées que le *Guiera senegalensis* améliore la qualité du sol en augmentant la quantité de matières organiques du sol [11, 12]. Si on se base sur les résultats de [13], qui rapporte que le front d'humectation du sol descend moins vite sur un traitement avec matière organique par rapport à un traitement témoin. Et il existe une relation significative entre la teneur en matières organiques et le rendement des cultures [11]. Au stade de remplissage des grains on a observé une grande quantité d'eau disponible dans la zone racinaire au niveau des parcelles non stressées (le 30 Mai). A cette période les cultures ont fini la phase de développement et réduisent leur transpiration, en plus on note aussi une diminution de l'évaporation du sol du fait que dans cette étape les cultures ont atteint la taille maximale pour couvrir le sol (réduction des radiations solaires arrivant à la surface du sol) et réduit la vitesse du vent. Ceci diminue donc l'évapotranspiration et par conséquent augmente le stock hydrique.

4-2. Comparaison de l'ETR_model et de l'ETR_calculé à partir du bilan hydrique

La diminution de la consommation hydrique des cultures est plus marquée sur le traitement PAS, en effet sur ce traitement, le stock devait s'épuiser plus vite du fait de la consommation hydrique combinée des cultures et des arbustes. Le drainage en profondeur est quasi-nulle sur le traitement PAS, donc en cas de stress hydrique terminal, la présence de l'arbuste peut avoir comme effet une diminution significative des pertes par drainage. Les valeurs de l'évapotranspiration de référence (ET_o) obtenues corroborent ceux en zones semi-arides données dans [7]. En début du cycle, l'évapotranspiration réelle des cultures étaient plus faibles que la référence. En effet à partir de la levée jusqu'à l'étape de montaison, l'évapotranspiration des cultures était composée en grande partie par l'évaporation du sol. Et lorsque les cultures ont atteint leurs tailles maximales (environ 113 cm) l'ETR réelle devient supérieure à l'ETP, ceci montre qu'à ce stade de développement des cultures, les besoins en eau sont beaucoup plus importants. Aussitôt après l'imposition du stress les valeurs des évapotranspirations réelles ont diminué considérablement dans les traitements stressés. En effet la quantité d'eau évapotranspirée est liée au stock d'eau contenue dans le sol. Par ailleurs dans les traitements non stressés on n'a constaté une diminution de l'ETR réelle que dans la période pré-récolte ; à cause de la diminution de la consommation hydrique de cultures dans cette période. La courbe de l'ETR décroît plus rapidement sur le traitement PAS que sur le traitement SAS. En effet sur le PAS en plus du stress hydrique, la présence de l'arbuste a favorisé l'épuisement rapide du profil. Mais les cultures qui étaient sur ce traitement ont atteints la maturité et ont produits des épis.

4-3. Bilan des consommations hydriques des cultures

Sur les consommations hydriques sur les différents traitements, avant l'imposition du stress, les mesures faites à la date du 14 Mai, montrent que les traitements PANS, SANS et PAS avaient des consommations très voisines mais la consommation du traitement SAS est plus faible par rapport aux autres. Ce déficit est dû à une certaine quantité d'eau qui a drainé au-delà de la limite de la zone racinaire sur le traitement SAS. Les mesures faites à l'étape pré-récolte révèlent que sur le traitement SANS ; la consommation hydrique est égale à 353 mm, plus grande que celle mesurée sur le PANS qui vaut 347 mm. En effet avec le stress, le stock dans la zone racinaire des traitements avec arbustes s'est épuisé plus vite par rapport aux traitements sans arbustes du fait de la présence des arbustes. Cependant les cultures dans les parcelles avec arbustes ont montré une meilleure résistance au stress comparés aux sans arbustes. Ceci pourrait s'expliquer par le fait que avant l'imposition du stress, les cultures qui se trouvaient dans ces parcelles ont atteints un stade avancé pour développer un système racinaire important pour puiser de l'eau sur des valeurs de tensions du sol faibles. Des différences ont été observées sur les valeurs de potentiel hydrique au point de flétrissement sur les traitements avec arbustes et sans arbustes [14]. Les valeurs de consommations hydriques obtenus sur les différents traitements, restent à discuter, en effet la détermination du stock hydrique n'a pas été faite sur toute la profondeur de la zone racinaire. Car la sonde dont nous disposons pour suivre l'humidité du sol ne nous permettait pas de mesurer l'humidité au-delà de 01 mètre. Donc, sur tous les traitements, il y'a une quantité d'eau qui a drainé au-delà de 1 mètre qui n'a pas été évaluée et prise en compte dans le calcul du bilan. On peut donc dire qu'en plus du phénomène d'ascenseur hydraulique constaté en hivernage, la présence des arbustes près des cultures peut accélérer le cycle de développement de ces derniers. L'association Guiera-cultures favorise le développement d'un système racinaire vigoureux pour explorer un large volume de sol pour de l'eau et des nutriments [3]. En ce qui concerne le développement des cultures, celles qui se trouvaient dans les parcelles avec arbustes se sont beaucoup plus épanouies. Bright montre que les arbustes améliorent l'efficacité sur l'utilisation de l'eau de la pluie par le mil et l'arachide au Sénégal s'ils sont associés [15, 16]. A tout point de vue le mil qui se trouvait dans les PA s'est plus développé, et ces cultures étaient plus susceptibles d'être gênés par les arbustes.

5. Conclusion

Cette étude nous a permis de mettre en évidence que l'association Guiera senegalensis-mil favorise la rétention de l'eau dans la zone de prospection des racines du mil en conditions d'alimentation hydrique non limitée. La présence du *G. senegalensis* peut accélérer aussi le cycle de développement du mil. Cependant en cas de déficit hydrique, la présence de l'arbuste a favorisé un épuisement du stock hydrique du sol plus rapidement dans les parcelles avec arbustes que dans les témoins. Mais la présence du Guiera améliore la vigueur de développement des cultures. En condition non-limitante d'apport hydrique, il n'y'a pas de grande différence en termes de consommation hydrique entre les cultures associées et non associées. Par contre la différence sur la consommation hydrique est plus marquée lors d'une période de déficit hydrique, plus importante sur les cultures associées. Les résultats obtenus ne donnent pas une très bonne corrélation entre les consommations hydriques déterminées par la méthode du bilan hydrique et celle déterminée par le modèle de Penmann. En effet la sonde humidimétrique qui a été utilisé dans ce travail ne nous permettait pas de suivre les variations de l'humidité dans toute la zone racinaire du mil. En définitive, nous recommandons que des recherches plus approfondies soient menées sur l'association Guiera-cultures annuelles. Car ce travail mené en contre saison seulement ne suffit pas pour faire une bonne caractérisation des besoins en eau du mil en association avec les arbustes dans des conditions de stress et de non stress. Des efforts doivent être menés sur la compréhension de la capacité qu'à le Guiera senegalensis a mobilisé l'eau des horizons profonds vers les horizons superficiels. Faire un bilan hydrique avec les principales cultures du bassin arachidier en association avec d'autres arbustes. Pour des études futures, nous recommandons l'utilisation d'une sonde plus adaptée avec des tubes d'accès pouvant atteindre 2 mètres de profondeur pour suivre les variations de l'humidité dans toute la zone racinaire du mil.

Références

- [1] - D. HILLEL, *Physique du sol*, (1998)
- [2] - H.-N. LE HOUEROU, "Relations entre la variabilité des précipitations et celle des productions primaire et secondaire en zone aride," (1992)
- [3] - R. BAYALA *et al.*, "Intercropping with *Guiera senegalensis* in a semi-arid area to mitigate early-season abiotic stress in *A. hypogea* and *P. glaucum*," *J Agron Crop Sci*, Vol. 208, N° 2 (Apr. 2022) 158 - 167 p., doi: 10.1111/jac.12568
- [4] - F. KIZITO *et al.*, "Seasonal soil water variation and root patterns between two semi-arid shrubs co-existing with Pearl millet in Senegal, West Africa," *J Arid Environ*, Vol. 67, N°3 (Nov. 2006) 436 - 455 p., doi: 10.1016/j.jaridenv.2006.02.021
- [5] - A. LUFABA *et al.*, "Carbon stocks and patterns in native shrub communities of Senegal's Peanut Basin," *Geoderma*, Vol. 146, N°1 - 2 (Jul. 2008) 75 - 82 p., doi: 10.1016/j.geoderma.2008.05.024
- [6] - F. KIZITO *et al.*, "Soil water balance of annual crop-native shrub systems in Senegal's Peanut Basin : The missing link," *Agric Water Manag*, Vol. 90, N°1 - 2 (May 2007) 137 - 148 p., doi : 10.1016/j.agwat.2007.02.015
- [7] - R. G. ALLEN, L. S. PEREIRA, M. SMITH, D. RAES and J. L. WRIGHT, "FAO-56 Dual Crop Coefficient Method for Estimating Evaporation from Soil and Application Extensions," *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Vol. 131, N° 1 (Feb. 2005) 2 - 13 p., doi: 10.1061/(asce)0733-9437(2005)131:1(2)
- [8] - VAN GENUCHTEN, "A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils," (1980)
- [9] - Y. MUALEM, "A New Model for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Porous Media," (1976)
- [10] - C. DANCETTE, "Water Requirements and Adaptations to the Rainy Season of Millet in Senegal," *Agroclimatological Research Needs of the Semi-Arid Tropics*, (1978) 106 - 120 p.
- [11] - E. L. DOSSA *et al.*, "Crop Productivity and Nutrient Dynamics in a Shrub (*Guiera senegalensis*)-Based Farming System of the Sahel," *Agron J.*, Vol. 104, N° 5 (Nov. 2012) 1255 - 1264 p., doi: 10.2134/agronj2011.0399
- [12] - E. L. DOSSA, S. DIEDHIOU, J. E. COMPTON, K. B. ASSIGBETSE and R. P. DICK, "Spatial patterns of P fractions and chemical properties in soils of two native shrub communities in Senegal," *Plant Soil*, Vol. 327, N° 1 (Jan. 2010) 185 - 198 p., doi: 10.1007/s11104-009-0044-8
- [13] - L. CISSE, "Influence d'apports de matière organique sur la culture de mil et d'arachide sur un sol sableux du Nord Sénégal. II. &mdash ; Développement des plantes et mobilisations minérales," (1988)
- [14] - N. A. BOGIE, R. BAYALA, I. DIEDHIOU, R. P. DICK and T. A. GHEZZEHEI, "Alteration of soil physical properties and processes after ten years of intercropping with native shrubs in the Sahel," *Soil Tillage Res*, Vol. 182, (Oct. 2018) 153 - 163 p., doi: 10.1016/j.still.2018.05.010
- [15] - M. B. H. BRIGHT *et al.*, "Long-term *Piliostigma reticulatum* intercropping in the Sahel: Crop productivity, carbon sequestration, nutrient cycling, and soil quality," *Agric Ecosyst Environ*, Vol. 242, (May 2017) 9 - 22 p., doi: 10.1016/j.agee.2017.03.007
- [16] - M. B. H. BRIGHT *et al.*, "An overlooked local resource: Shrub-intercropping for food production, drought resistance and ecosystem restoration in the Sahel," *Agric Ecosyst Environ*, vol. 319, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.agee.2021.107523