

## Evaluation de l'impact de stress hydriques sur la croissance et le rendement du mil (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.) pour deux conditions de fertilisation azotée dans un environnement tropical semi-aride

### [ Evaluation of water stress impact on growth and yield of pearl millet (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.) for two nitrogen fertilization conditions in semi-arid tropical environment ]

Laopé Ambroise Casimir SIENE<sup>1-2-3</sup>, Dago Faustin SOKO<sup>2-4</sup>, Omar DIOUF<sup>3</sup>, and Séverin AKE<sup>2</sup>

<sup>1</sup>UFR des Sciences Biologiques / Département de Biologie Végétale,  
Université Peleforo GON COULIBALY, Korhogo, Côte d'Ivoire

<sup>2</sup>UFR Biosciences / Laboratoire de Physiologie Végétale,  
Université Félix HOUPOUËT-BOIGNY, Abidjan, Côte d'Ivoire

<sup>3</sup>Centre d'Etude Régional pour l'Amélioration de l'Adaptation à la Sécheresse (CERAAS), Thiès, Sénégal

<sup>4</sup>Laboratoire de Physiologie et Pathologie Végétale,  
Université Jean Lorougnon GUEDE, Daloa, Côte d'Ivoire

---

Copyright © 2016 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the *Creative Commons Attribution License*, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

**ABSTRACT:** The Sahel low agricultural yields are gone due to poor soils, drought and rainfall variability. Knowledge and understanding of the interactive effects of drought and nitrogen fertilization on growth of millet appear important. For this purpose the SOUNA3 millet was used as an experimental split-plot with two factors and four replications during the dry season in 2002. The water regime factor was used at two levels (watered and water-stressed) and the nitrogen fertilization factor also at two levels (without nitrogen, F0 and with a nitrogen supply of 68.5 kg ha<sup>-1</sup>, F1). The water-stressed was applied during the vegetative stage and the grain formation and filling phases. The values of water consumption, the plant water status and the leaf area index were measure during the plant growth. The above dry matter was calculated at each development stage. Yield was calculated at the end of cycle. The results of the water consumption of plants and leaf water potential showed that water stress has reduced the values of these parameters and no difference was showed between nitrogen fertilization treatments whatever the level considered water regime. As for the values of leaf area index and the above dry biomass production, they were higher in fertilized plants for a given water regime. The nitrogen increased the values of these parameters at the irrigated plants. The water deficit has reduced the yield of 52.79 % in stressed plants. The water deficit cancels the beneficial effect of nitrogen fertilization on millet growth and yield.

**KEYWORDS:** millet, fertilizing, drought, dry matter, yield.

**RESUME:** Au sahel les faibles rendements agricoles sont en parti dus à la pauvreté des sols, à la sécheresse et à la variabilité des pluies. La connaissance et la compréhension des effets interactifs de la sécheresse et de la fertilisation azotée sur la croissance et le rendement du mil apparaissent importantes. Pour ce faire, la variété de mil SOUNA3 a été semée sous un dispositif expérimental en split-plot à deux facteurs et quatre répétitions pendant la contre saison 2002. Le facteur régime hydrique à deux niveaux (irrigués et stressés) et le facteur fertilisation azotée également à deux niveaux (F0 sans apport

d'azote et F1 avec un apport d'azote de 68,5 kg ha<sup>-1</sup>). Le stress hydrique a été appliqué pendant les phases végétatives et de formation et de remplissages des grains. La consommation en eau, l'état hydrique des plants et l'indice de surface foliaire ont été suivis au cours du cycle de la culture. Les biomasses sèches aériennes des plants ont été mesurées à chaque stade phénologique. Le rendement a été calculé en fin de cycle. Les résultats de la consommation en eau et du potentiel hydrique foliaire n'ont montré aucune différence entre les traitements azotés quel que soit le niveau de régime hydrique considéré. Le stress hydrique a réduit les valeurs de ces paramètres. Quant aux valeurs de l'indice de surface foliaire et de production de biomasse sèche aérienne, elles ont été plus élevées au niveau des plants fertilisés pour un régime hydrique donné. L'apport d'azote a augmenté les valeurs de ces paramètres au niveau des plants irrigués. Le déficit hydrique a réduit le rendement en grains de 52,79 % chez les plants stressés. Par contre, aucune différence n'a été observée entre les traitements azotés quel que soit le régime hydrique. L'apport d'une fertilisation azotée couplé à une bonne pluviométrie améliorerait la croissance et la production du mil. Par contre le déficit hydrique annulerait l'effet bénéfique de la fertilisation azotée sur la croissance et le rendement grain chez le mil.

**MOTS-CLEFS:** mil, fertilisation, sécheresse, biomasse, rendement.

## 1 INTRODUCTION

Le mil pénicillaire ou mil à chandelles (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.) est une graminée céréalière annuelle qui serait originaire d'Afrique de l'ouest où l'on rencontre les diverses formes, cultivées et sauvages [1]. En fonction du volume de la production et des surfaces cultivées, le mil se classe au septième rang mondial et regroupe un ensemble de céréales qui ont pour caractéristique commune la petitesse de leurs grains [2]. Environ 95 % des surfaces cultivées se trouvent dans les pays en développement à faible pluviométrie, surtout en Afrique et en Asie. Dans les régions les plus pauvres comme au Sahel, où la sécurité alimentaire est la plus précaire, le mil est d'une importance vitale car il constitue non seulement un aliment de base des populations [3], mais aussi la seule céréale d'importance économique [4].

Au Sahel, la faiblesse du rendement en mil a pour cause principale la pluviométrie déficitaire et irrégulière aggravée par une baisse de la fertilité des sols [3]. Les rendements moyens sur le mil au Sénégal sont plus faibles (400-600 Kg ha<sup>-1</sup> de grains) que ceux des autres céréales (80 % du rendement moyen des céréales qui est de l'ordre de 800 kg ha<sup>-1</sup>) alors que son potentiel atteint 2500 à 3000 Kg.ha<sup>-1</sup> ([5], [6]). En effet, entre le Sahara et la savane soudanaise, le Sahel est caractérisé par une pluviométrie annuelle de 300 à 700 millimètres, en une saison de trois à quatre mois, de juin à septembre [4]. Le reste de l'année ne compte généralement aucune averse [4]. La fréquence et le caractère aléatoire des périodes de sécheresse y sont tels (coefficient de variation de 30-35 %) qu'une récolte de mil n'est garantie que 4 ans sur 5 [7]. Les sols sahéliens étant pauvres, ces conditions entraînent des difficultés de maintien de la productivité, d'autant que la plupart des paysans ne disposent pas des moyens nécessaires à l'utilisation d'engrais minéraux [4].

Dans ces conditions de baisse de fertilité des sols et de risque de sécheresse, la relance de l'agriculture par l'intensification des systèmes de culture reste dépendante de la connaissance préalable de la complexe interdépendance de ces facteurs. En effet, la majorité des travaux se sont focalisés sur le comportement du mil soit face à la sécheresse ([8], [9], [10]) soit vis-à-vis de la fertilité ([4], [11], [12], [13], [14]). Les études portant sur les effets de l'interaction entre la disponibilité de l'eau et de l'azote restent fragmentaires [3] et concernent notamment les paramètres d'élaboration du rendement et la production ([15], [16], [17]). De ce fait, les effets de l'interaction de ces deux facteurs sur les processus agrophysiologiques du mil sont moins connus.

La connaissance et la compréhension des effets interactifs de la sécheresse et de la fertilisation azotée sur la croissance et le rendement du mil apparaissent importantes. Pour ce faire, nous avons conduit des travaux de recherche dont la démarche expérimentale adoptée compare les traitements hydrique et azoté en contre saison sèche. L'objectif final de cette démarche est d'étudier la réponse à l'interaction sécheresse x fertilité azotée chez le mil afin de fournir un cadre d'analyse pour mieux raisonner la fertilisation azotée face au risque climatique. Les objectifs spécifiques en fonction des traitements sont de :

- caractériser l'état hydrique et la consommation en eau des plants de mil ;
- étudier l'évolution de l'indice de surface foliaire au cours du cycle et la production de biomasse sèche aérienne à chaque stade phénologique des plants de mil ; et
- déterminer le rendement et ses composantes en fin de cycle.

## 2 MATÉRIEL ET MÉTHODES

### 2.1 SITE EXPÉRIMENTAL ET CONDUITE DE LA CULTURE

L'essai a été conduit au Centre National de Recherche Agronomique de Bambey (CNRA) situé au Centre-Ouest du Sénégal (14,42°N et 16,28°W). Le climat de la localité est de type sahélien avec une longue saison sèche (de novembre à mai) et une courte saison des pluies (de juillet à octobre) avec un total annuel moyen voisin de 550 mm. Les humidités à la capacité au champ et au point de flétrissement permanent sont respectivement de l'ordre de  $0,13 \text{ cm}^{-3} \cdot \text{cm}^{-3}$  et  $0,04 \text{ cm}^{-3} \cdot \text{cm}^{-3}$ , donnant une réserve utile de l'ordre de  $90 \text{ mm} \cdot \text{m}^{-1}$  ([18], [19]). Le site expérimental a été labouré en début d'expérimentation. Le semis en humide a été effectué le 03 mai 2002 avec des semences traitées au fongicide, SPINOX-T (Captafol 10%, Benomyl 10%, Carbofuran 20%) avec des écartements de 90 cm x 90 cm. La levée a eu lieu quatre jours après semis. Le démariage à trois pieds par poquet s'est fait à partir du 14<sup>e</sup> jour après semis (JAS). Les sarclo-binages, les traitements phytosanitaires et la protection anti-aviaire ont été assurés de façon à minimiser l'incidence de ces facteurs.

### 2.2 MATERIEL VEGETAL

La variété de mil SOUNA3 étudiée est une population synthétique au cycle moyen de 90 jours. Il présente des valeurs minimales, moyennes et maximales de besoins en eau respectivement de 380 mm, 418 mm et 460 mm [20]. C'est désormais quasiment le seul mil cultivé dans toute la moitié Nord du Sénégal. Mais il reste également très cultivé dans la moitié Sud du pays.

### 2.3 TRAITEMENTS ETUDIÉS ET DISPOSITIF EXPERIMENTAL

#### 2.3.1 REGIME HYDRIQUE ET APPLICATIONS DES STRESS HYDRIQUES

Deux régimes hydriques ont été appliqués : un régime maintenu à évapotranspiration maximale (ETM) avec irrigation de complément au besoin tout le long du cycle et un régime «stressé (STR)» avec arrêt de l'irrigation durant la phase végétative (du 22<sup>e</sup> au 44<sup>e</sup> jour après semis, 22 jours de stress) et la phase de formation-remplissage des grains (du 78<sup>e</sup> au 94<sup>e</sup> jour après semis, 16 jours de stress), soient deux cycles de déficit hydrique correspondant aux conditions généralement rencontrées dans la zone ([21], [22], [23]). L'irrigation a été réalisée à l'aide des rampes basculantes permettant d'irriguer simultanément et de façon homogène des bandes de culture regroupant les parcelles élémentaires de même niveau de régime hydrique de chaque répétition. Des mini-pots d'une capacité de 35 mm installés dans chaque parcelle élémentaire ont permis de contrôler la quantité d'eau apportée par irrigation.

#### 2.3.2 FERTILISATION AZOTÉE

Deux niveaux de fertilisation azotée ont été appliqués : le niveau F0, traitement sans apport d'azote simulant les conditions de sol pauvre fréquemment rencontrées en milieu paysan et le niveau F1, traitement correspondant à la fertilisation actuellement vulgarisée soit  $22,5 \text{ kg N} \cdot \text{ha}^{-1}$  à la levée +  $23 \text{ kg N} \cdot \text{ha}^{-1}$  au démariage et  $23 \text{ kg N} \cdot \text{ha}^{-1}$  à la montaison. L'azote a été apporté à la levée sous forme d'engrais ternaire de formule 15-10-10. Les autres apports d'azote ont été effectués sous forme d'urée. A la levée, le phosphore et le potassium ont été apportés à raison de  $22,5 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$  pour l'ensemble des traitements.

#### 2.3.3 DISPOSITIF EXPERIMENTAL ET TRAITEMENTS

Un dispositif expérimental en split-plot à quatre répétitions et deux facteurs a été utilisé : le régime hydrique (facteur en sous-bloc) et l'azote (facteur en parcelles élémentaires) soit 16 parcelles élémentaires et 4 traitements (ETMF0, ETMF1, STRF0 et STRF1). Les mesures destructives ont été faites au hasard sur 3 poquets par parcelles élémentaire dans la zone de prélèvement entourant la parcelle utile située au centre de la parcelle élémentaire.

### 2.4 MESURES ET OBSERVATIONS

#### 2.4.1 MESURES DE LA CONSOMMATION EN EAU DES PLANTS DE MIL

Les mesures d'humidité volumique à la sonde à neutron ont permis de calculer les variations de stock d'eau du sol ( $\Delta\text{stock}$ ) entre deux dates de mesures. L'évapotranspiration réelle (ETR) ou consommation en eau des plants a été calculée à

partir de  $\Delta\text{stock}$ , des apports d'eau par les pluies (P) et les irrigations (I) selon la relation simplifiée du bilan hydrique au cours du cycle de la culture :  $\text{ETR} = P + I \pm R - D_r + \Delta\text{Stock}$  ; avec  $\Delta\text{Stock} = \text{Stock}_t - \text{Stock}_{t-1}$ .

#### **2.4.2 MESURES DE L'ÉTAT HYDRIQUE DES PLANTS DE MIL**

Le potentiel hydrique foliaire caractérise l'état énergétique de l'eau dans la plante et constitue par conséquent un indicateur de l'état hydrique des plants. Il a été mesuré à l'aide d'une presse hydraulique à membrane (Campbell J 14 Instruments, [24]) calibré à l'aide de psychromètres C30. Les mesures ont été réalisées entre 11 h 30 mn et 13 h 30 mn, deux fois par semaine pendant les phases de stress. Elles ont été faites sur un petit échantillon prélevé sur la troisième feuille à partir du sommet. Trois poquets choisis de façon aléatoire ont été mesurés par parcelle élémentaire.

#### **2.4.3 SUIVI DE LA PHENOLOGIE DES PLANTS DE MIL**

Le suivi des différents stades de développement a été réalisé tous les jours sur les parcelles utiles. La levée, le tallage, la montaison, l'épiaison, la floraison, la formation grains et la maturité ont été considérés comme atteints lorsqu'ils étaient observés sur 50 % des poquets. Un brin a été considéré à la floraison quand la sortie des stigmates couvrait 50 % de l'épi et un poquet a été considéré à la floraison quand 50 % de ses tiges avaient atteint la floraison femelle [25]. Les grains étaient notés à maturité quand, dans l'ensemble, ils étaient devenus durs et détachables. La distinction de ces différents stades a permis de situer l'application des déficits hydriques, les apports d'azote et l'évolution de la biomasse [3].

#### **2.4.4 MESURE DE L'INDICE DE SURFACE FOLIAIRE DES PLANTS DE MIL**

L'indice de surface foliaire (LAI) correspond à la surface des feuilles rapportée à la surface de sol occupée. Il a été mesuré à l'aide du LAI-2000 (LI-COR, Inc., Lincoln, Nebraska 68504, USA), une fois par semaine à partir du 2<sup>e</sup> JAS entre 7 h 00 mn et 8 h 00 mn. Dans chaque parcelle élémentaire, une mesure de la radiation incidente a été effectuée au-dessus du couvert végétal, ensuite six mesures ont été effectuées en-dessous du couvert végétal le long des diagonales formées par quatre poquets. Cette série de mesures a été répétée trois fois à l'intérieur d'une parcelle élémentaire. L'intégration de ces données a permis de calculer le LAI. L'appareil fournit également une estimation de la proportion de rayonnement transmis au sol qui correspond au LTR qui est aussi appelée DIFN.

#### **2.4.5 SUIVI DE LA CROISSANCE ET DE LA PRODUCTION DE BIOMASSE SECHE AERIENNE DES PLANTS DE MIL**

La production de biomasse sèche aérienne a été suivie à chaque stade de développement. L'ensemble des mesures a été effectué sur trois poquets prélevés de façon aléatoire dans la zone destinée aux mesures destructives de chaque parcelle élémentaire. Les poquets prélevés ont été séparés en leurs différents organes qui ont été mis à sécher. Les biomasses ont été pesées après un pré-séchage dans une serre puis un passage à l'étuve à 65 °C durant 48 h.

#### **2.4.6 MESURE DU RENDEMENT ET DE SES COMPOSANTES**

A la récolte, sur la parcelle utile, les différentes parties aériennes ont été pesées séparément : paille (tiges + feuilles), épis productifs, épis improductifs et grains. Les rendements en grains et en matière sèche totale aérienne ont été calculés à partir des poids secs respectifs et de la surface de la parcelle utile (4,86 m<sup>2</sup>).

### **2.5 ANALYSES STATISTIQUES**

Le tableur Excel a été utilisé pour le calcul de moyennes des données et pour le tracé de graphiques. Il a aussi été utilisé pour le calcul des intervalles de confiance au seuil de 5 % et pour leurs illustrations graphiques. Une analyse de variance à deux facteurs a été réalisée sur les variables du rendement à l'aide du logiciel SAS. Le classement des moyennes a été fait avec le test de Student Newman Keul's.

### 3 RÉSULTATS

#### 3.1 DÉTERMINATION DES STADES PHÉNOLOGIQUES DES PLANTS DE MIL

Le Tableau 1, montre les différents stades phénologiques, ainsi que les jours après semis (JAS) leurs correspondants.

#### 3.2 CONSOMMATION EN EAU ET ÉTAT HYDRIQUE DES PLANTS DE MIL

Les résultats de la consommation en eau des plants (ETRj) ont montré une différence entre les plants irrigués et ceux stressés à partir du 3<sup>e</sup> jour après application du premier déficit hydrique et à partir du 10<sup>e</sup> jour pour le deuxième stress (Figure 1a). Le dernier déficit a été plus marqué avec des valeurs d'ETRj proches de zéro. Aucune différence n'a été observée entre les traitements azotés quel que soit le niveau de régime hydrique considéré. L'ETR cumulée des plants irrigués a été supérieure à celle des plants stressés avec des moyennes respectives de 459 mm et 332 mm. Les résultats du potentiel hydrique foliaire ont également montré une différence entre les plants irrigués et les plants stressés pendant la première phase de déficit hydrique (Figure 1b). Il a été supérieur chez les plants irrigués avec une valeur de - 0, 16 MPa. Cependant, durant le deuxième déficit hydrique la différence entre les plants irrigués et stressés n'a été observée qu'au 89<sup>e</sup> JAS. A cette date, les plants fertilisés stressés ont présenté de faibles valeurs de potentiel hydrique par rapport à ceux non fertilisés.

#### 3.3 EFFETS DES TRAITEMENTS HYDRIQUE ET AZOTE SUR LA CROISSANCE DES PLANTS DE MIL

##### 3.3.1 ÉVOLUTION DE L'INDICE DE SURFACE FOLIAIRE AU COURS DU CYCLE

D'une manière générale, l'indice de surface foliaire (LAI) des plants a régulièrement augmenté jusqu'à une valeur optimale puis a régressé en fin de cycle (Figure 2). Le LAI maximum a été atteint au 61<sup>e</sup> JAS soit en début d'épiaison pour les plants irrigués et au 73<sup>e</sup> JAS, soit à la floraison pour les stressés. L'effet du premier déficit hydrique a été observé au 35<sup>e</sup> JAS soit 13 jours après l'application du déficit hydrique et a été maintenu jusqu'au 42<sup>e</sup> JAS soit 20 jas après la mise en place du déficit hydrique. Le deuxième déficit hydrique quant à lui, a affecté les plants stressés à partir du 82<sup>e</sup> JAS soit 4 jours après application du déficit hydrique et ceci jusqu'au 94<sup>e</sup> JAS. Au cours de la première phase de déficit hydrique, une interaction entre le régime hydrique et la fertilisation azotée a été observée au 42<sup>e</sup> JAS. En effet, la fertilisation azotée a influencé l'indice de surface foliaire chez les plants irrigués par rapport aux plants stressés. Les plants irrigués avec apport d'azote ont présenté un indice de surface foliaire supérieur à celui des plants irrigués sans apport d'azote. Aucune différence n'a été observée au niveau des plants stressés quel que soit le traitement azoté. Au cours du deuxième déficit hydrique, contrairement au premier, l'effet de la fertilisation azotée sur l'indice de surface foliaire a été significatif au niveau des plants stressés au 82<sup>e</sup> JAS. A cette date, le LAI de F1 a été plus élevé. Dans l'ensemble, pour un régime hydrique donné, le LAI a été plus élevé pour les plants fertilisés.

##### 3.3.2 ÉVOLUTION DE LA BIOMASSE SÈCHE AÉRIENNE PRODUITE A CHAQUE STADE DE PHÉNOLOGIQUE

L'effet de l'azote sur la production de biomasse sèche aérienne a été significatif du 66<sup>e</sup> au 101<sup>e</sup> JAS (Figure 3). L'effet du premier déficit hydrique sur la croissance a été significatif à partir du 45<sup>e</sup> JAS, 13 jours après l'application du stress. L'effet du deuxième déficit hydrique a été significatif aux 82<sup>e</sup> et 101<sup>e</sup> JAS. L'apport d'azote a augmenté la biomasse des plants irrigués.

#### 3.4 EFFETS DES TRAITEMENTS HYDRIQUES ET AZOTE SUR LE RENDEMENT ET SES COMPOSANTES DES PLANTS DE MIL

##### 3.4.1 COMPOSANTES DU RENDEMENT

Le Tableau 2, présente les composantes du rendement en grains. Le nombre d'épis productifs (NBEP), le nombre d'épis improductifs (NBEIP) et l'indice de récolte (IR) n'ont pas été affectés par le régime hydrique. Tandis qu'ils ont été influencés par la fertilisation azotée. Chez les plants fertilisés, le NBEP et le NBEIP ont été plus élevés. Par contre, l'indice de récolte, a été supérieur chez les plants non fertilisés. Le poids 1000 grains a été affecté par le régime hydrique et la fertilisation azotée. Il a été supérieur chez les plants irrigués par rapport aux plants stressés, et plus faible chez les plants fertilisés que chez les non fertilisés. Le nombre de grains n'a été affecté que par le régime hydrique. Il a été supérieur chez les plants irrigués par rapport aux plants stressés.

### **3.4.2 RENDEMENT EN GRAINS**

Le régime hydrique a affecté le rendement grains ( $\alpha = 0,0165$ ). Les plants irrigués ont obtenu un rendement en grains supérieur à ceux stressés avec une moyenne de 1,61 contre 0,85 pour les stressés (Tableau 2). Le déficit hydrique a donc réduit le rendement en grains de 52,79 % chez les plants stressés. Par contre, aucune différence n'a été observée entre les traitements azotés quel que soit le régime hydrique (Figure 3).

## **4 DISCUSSION**

### **MANIFESTATION DES TRAITEMENTS HYDRIQUE ET AZOTÉ SUR L'ÉTAT HYDRIQUE DE LA CULTURE, LE DÉVELOPPEMENT DU COUVERT VÉGÉTAL AINSI QUE SUR LE RENDEMENT ET SES COMPOSANTES**

L'analyse de l'évolution de l'évapotranspiration journalière (ETRj), des consommations en eau cumulées sur le cycle (ETRc) et du potentiel hydrique foliaire ( $\Psi$ ) a montré que les plants qui devraient être maintenues à évapotranspiration maximale (ETM) ont été bien alimentés jusqu'à la floraison (73<sup>e</sup> JAS). Durant cette période, ils ont été différents de ceux stressés avec des valeurs de LAI et de biomasse sèche aérienne plus élevées. La référence [3] corrobore ce résultat. De même, l'effet de l'azote a été significatif sur ces paramètres, avec un bon développement des plants fertilisés. Même si lors du premier déficit hydrique la biomasse aérienne des plants fertilisés ont été plus élevée, son LAI a été réduit aux mêmes valeurs que ceux non fertilisés. Cependant, à la récupération le LAI des plants fertilisés a augmenté. Durant cette période, l'effet de l'azote n'a pas été mis en évidence sur les paramètres d'état hydrique des plants. L'apport d'eau sous-estimé au cours de la phase de formation et de remplissage des grains (92<sup>e</sup> JAS) a entraîné une insatisfaction des besoins en eau à cause du fort développement végétatif noté précédemment chez les plants fertilisés, provoquant par conséquent un léger déficit hydrique au cours de cette phase. En effet, durant cette période, il a été enregistré une baisse des besoins en eau journaliers (ETRj) et une chute du potentiel hydrique foliaire au niveau des plants. Cela s'est fait ressentir par un ralentissement et une baisse du développement du couvert végétal montrée par le LAI. La différence observée au niveau du potentiel hydrique foliaire entre les plants stressés en F1 et en F0 pourrait se justifier par un besoin en eau élevé au niveau des plants fertilisés qui ont développé un couvert végétal important au cours de cette période. Ce déficit hydrique s'est traduit par une forte réduction du rendement des plants en conditions de fertilisation azotée quel que soit le régime hydrique. Le rendement des plants maintenus à ETM a été inférieur aux rendements de 2,5 à 3 t.ha<sup>-1</sup> obtenus par la référence [3] en conditions d'alimentation hydrique favorable. En effet, le déficit hydrique a causé une absence de l'effet de l'azote sur le rendement en grains, de telle sorte qu'il n'y a pas eu de différences entre la production en grains des plants fertilisés et celle des plants non fertilisés. Les plants fertilisés avec un développement végétatif plus élevé ont eu des besoins en eau plus importants et ayant produit plus d'épis n'ont pas eu la quantité d'eau nécessaire pour assurer le remplissage des grains donc le transfert d'assimilats vers ceux-ci [26]. Il a été obtenu un rendement en grains égal à celui des plants non fertilisés qui ont produit moins d'épis et qui ont su assurer au mieux le transfert d'assimilats pour le remplissage des grains. Cela est aussi valable pour les plants stressés sévèrement, mais avec des rendements encore plus faibles. La réduction plus marquée du nombre d'épis productifs en conditions de déficit hydrique s'expliquerait par l'augmentation du nombre d'épis improductifs. Conséquence d'une allocation plus faible des assimilats vers la formation des grains. En effet, d'après la référence [26], le déficit hydrique aurait des conséquences immédiates sur les épis se trouvant encore en phase précoce d'évolution (épiaison, floraison et fécondation), ou sur les grains en début de remplissage. Ceci aurait pour conséquence qu'à maturité, un certain nombre de grains ne soit pas formés ou que leur poids reste équivalent à celui des enveloppes. Cet effet plus marqué du déficit hydrique en conditions de fertilisation azotée a été déjà mis en évidence par la référence [3]. Ceci serait lié à un meilleur état hydrique en conditions d'absence de fertilisation qui serait favorable au transfert des assimilats. Pour ce qui concerne les assimilats azotés, leur transfert serait lié à une activité glutamine synthétase plus élevée.

## **5 CONCLUSION**

Des différences dans la réponse à l'interaction sécheresse-fertilité azotée ont été observées sur la croissance et le rendement du mil. En effet, les résultats de notre étude ont montré que le stress hydrique réduit les valeurs de la consommation en eau des plants ainsi que le potentiel hydrique foliaire et que ces paramètres ne sont pas affectés par les traitements azotés quel que soit le niveau de régime hydrique considéré. L'apport d'azote a augmenté les valeurs de l'indice de surface foliaire ainsi que celles de la production de biomasse sèche aérienne. Ces valeurs ont été plus élevées au niveau des plants fertilisés pour un régime hydrique donné. Quant au rendement en grains, il a été réduit par le stress hydrique. Par contre, aucune différence n'a été observée entre les traitements azotés quel que soit le régime hydrique. Au terme de cette

étude, il apparaît que l'apport d'une fertilisation azotée couplé à une bonne pluviométrie améliorerait la croissance et le rendement en grains du mil. Par contre, la survenue de déficits hydriques au cours du cycle de la culture annulerait l'effet bénéfique de la fertilisation azotée sur la croissance et le rendement grain chez le mil.

## REMERCIEMENTS

Cette étude a été réalisée grâce à l'appui financier du CIRAD. Nos remerciements vont à l'endroit du DAAD (Deutscher Akademischer Austausch Dienst ou German academic exchange service) pour la bourse octroyée au premier auteur. Nos remerciements vont également à l'endroit d'Ibrahima N'DONG du service technique du CERAAS à Bambey (Sénégal) et à travers lui tous les autres agents dudit service.

## 6 TABLEAUX ET FIGURES

Tableau 1. Phénologie

Stades phénologiques	Semis	Tallage	Montaison	Epiaison	Floraison	Récolte
Jours après semis (JAS)	0	24	45	66	82	101

Tableau 2. Composantes du rendement

..	NBEP	NEIP	NGm <sup>-2</sup>	P1000G	RG	IR
RH	<i>P=0.7137</i>	<i>P=0.1147</i>	<b><i>P=0.0240</i></b>	<b><i>P=0.0474</i></b>	<b><i>P=0.0165</i></b>	<i>P=0.0522</i>
ETM	34.25a	6.88a	21706.02a	7.41a	1.61a	0.18a
STR	33.13a	10.50a	13547.95b	6.26b	0.85b	0.13a
FN	<b><i>P=0.0036</i></b>	<b><i>P=0.0022</i></b>	<i>P=0.3815</i>	<b><i>P=0.0022</i></b>	<i>P=0.4719</i>	<b><i>P=0.0007</i></b>
F0	23.75b	4.50b	17096.93b	7.25a	1.26b	0.18a
F1	43.63a	12.88a	18157.04b	6.42b	1.20b	0.12b

Pour une variable et un effet donné, les moyennes affectées de la même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de 5 %, test de Student Newman Keul's ; RH= régime hydrique, FN= fertilisation azotée, P= probabilité d'effet significatif, TRAI.= traitement, ETM= évapotranspiration maximale, STR= stressé, F1= apport d'azote et F0= sans apport d'azote.

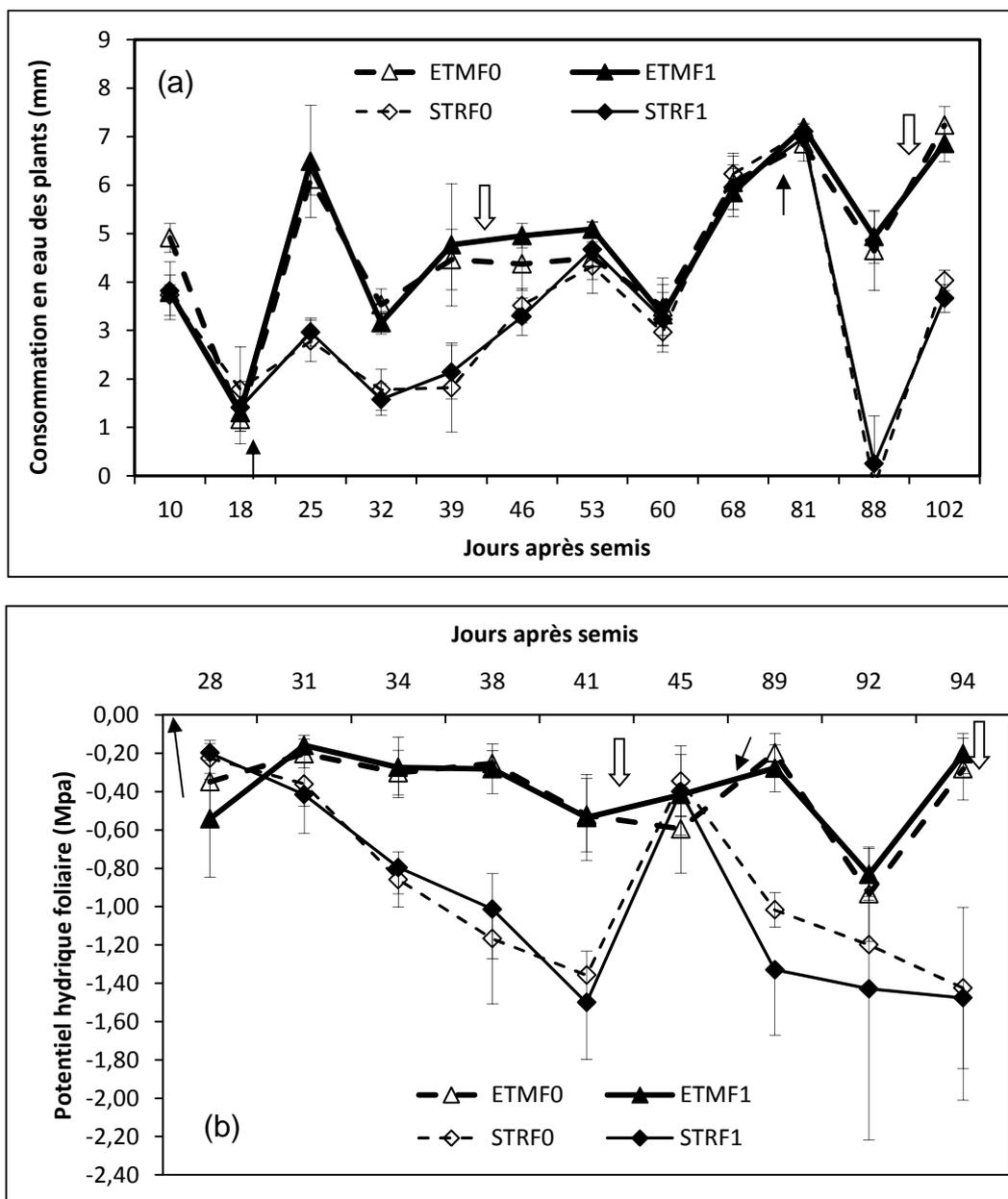


Fig. 1. Evolution de la consommation en eau (a) et du potentiel hydrique foliaire (b) des plants de mil

Les barres d'erreur représentent les intervalles de confiance au seuil de 5 % ; les flèches noires indiquent les dates d'application des stress et les blanches indiquent celles de la levée des stress.

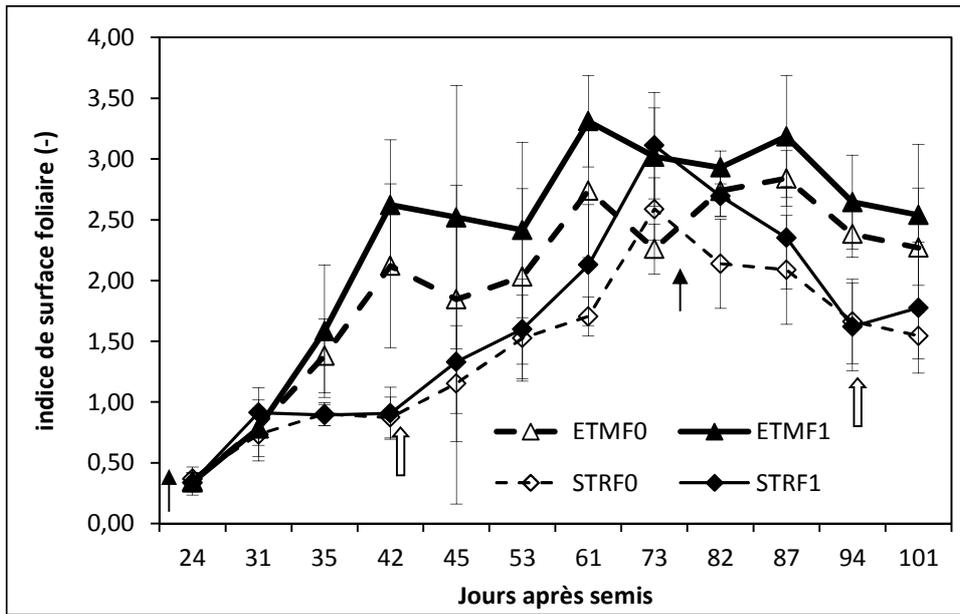


Fig. 2. Evolution de l'indice de surface foliaire des plants de mil au cours du cycle

Les barres d'erreur représentent les intervalles de confiance au seuil de 5 % ; les flèches noires indiquent les dates d'application des stress et les blanches indiquent celles de la levée des stress.

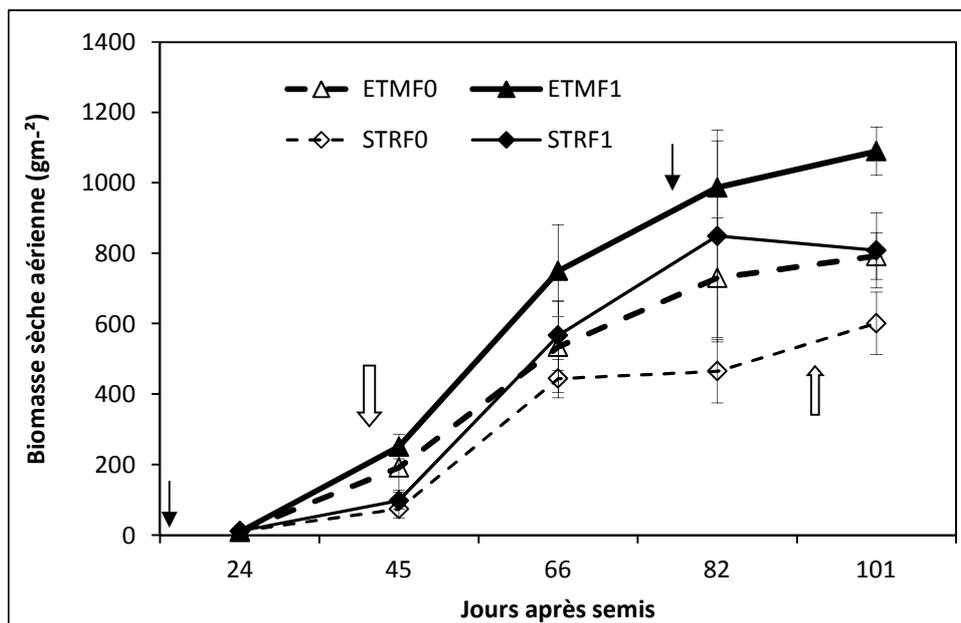


Fig. 3. Evolution de la biomasse sèche aérienne des plants de mil à chaque stade de développement

Les barres d'erreur représentent les intervalles de confiance au seuil de 5 % ; les flèches noires indiquent les dates d'application des stress et les blanches indiquent celles de la levée des stress.

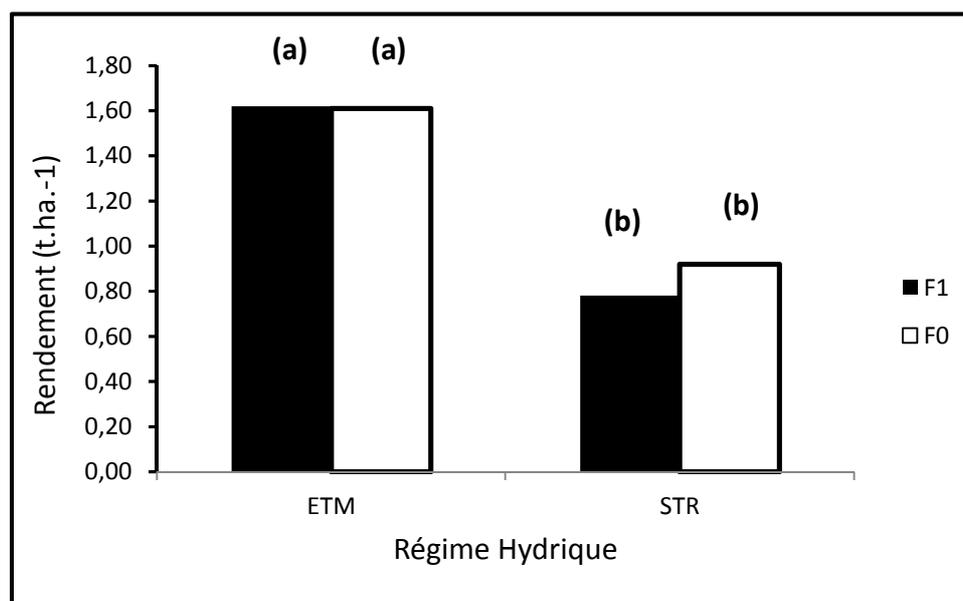


Fig. 4. Rendement

Pour une variable et un effet donné, les moyennes affectées de la même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de 5%, test de Student Newman Keul's : ETM = évapotranspiration maximale, STR = stressée, F1 = apport d'azote (68,5 kg/ha) et F0 = sans apport d'azote

#### REFERENCES

- [1] Tostain, S., and Marchais, L., *Evaluation de la diversité génétique du mil (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.) au moyen de marqueurs enzymatiques et relations entre formes sauvages et cultivées*. In: S. Hamon (Eds.), *Le mil en Afrique. Diversité génétique et agrophysiologique : potentialités et contraintes pour l'amélioration génétique et l'agriculture*, Orstom, Paris, pp. 33-56, 1993.
- [2] Anonyme, *L'économie mondiale du sorgho et du mil : faits, tendances et perspectives*, FAO, Rome, 1997.
- [3] O. Diouf, *Réponses agrophysiologiques du mil (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.) à la sécheresse : influence de la nutrition azotée*. Thèse Doct., Univ. Libre de Bruxelles, 2000.
- [4] A. De Rouw, "Gestion de la fertilité du sol sur un terroir sahélien : fumure animal, matière organique et encroûtement superficiel du sol dans les systèmes de culture du mil, étude du Niger", *Agriculture et développement*, vol.18, pp. 63-70, 1998.
- [5] J. McIntire and L. K. Fussel, "On-farm experiments with millet in Niger: Crop establishment, yield loss factors and economics analysis", *Exp. Agric.*, vol. 25, pp. 217-233, 1989.
- [6] C. B. Christianson, A. Bationo and W. E. Baethgen, "The effect of soil tillage and fertilizer use of pearl millet yields in Niger", *Plant Soil*, vol. 123, pp. 51-58, 1990.
- [7] Le Houerou, H. N., *Relations entre la variabilité des précipitations et celle de productions primaire et secondaire en zone aride*. In : H. Le Flocc, A. Grouzis, et J. C. Bille (Eds), *L'aridité : une contrainte au développement. Caractérisation, réponses biologiques, stratégies des sociétés*, Orstom, Paris, France, pp. 197-220, 1992.
- [8] F. Do, T. Winkel, L. Cournac and P. Louguet, "Impact of late-season drought on water Relations in a sparse canopy of millet (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.)", *Field Crop Res.*, vol. 48, pp. 103-113, 1996.
- [9] F. Do, *Réponses écophysiologicals de cultivars de mil (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.) à une sécheresse de fin de cycle en zone sahélienne : conséquences sur la stabilité du rendement*. Doctorat, Paris VII, Paris, 1994.
- [10] T. Winkel et F. Do, "Caractères morphologiques et physiologiques de résistance du mil (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.) à la sécheresse", *Agron. Trop.*, vol. 46, n°. 4, pp. 339-350, 1992.
- [11] De Rouw, A., Rajot, J. L., and Schmelzer, C., *Effets de l'apport de bouses de zébus sur les composantes du rendement du mil, sur les mauvaises herbes et sur l'encroûtement superficiel du sol au Niger*, In : A. Biases (Eds), *La conduite du champ cultivé. Point de vue d'agronomes*, Orstom, Paris, France, pp. 95-112, 1998.

- [12] J. Rockstrom and A. De Rouw, "Water, nutrients and slope position in on-farm Pearl millet cultivation in the Sahel", *Plant and Soil*, vol. 195, n°. 31, pp. 1-327, 1997.
- [13] F. Ganry, J. Bideau et R. Nicou, "Action de la fertilisation azotée et de l'amendement organique sur le rendement et la valeur nutritionnelle du mil Souna III", *Agron. Trop.*, vol. 29, n°. 10, pp. 1006-1015, 1974.
- [14] R. K. Pandey, J. W. Maranville and Y. Bako, "Nitrogen fertilizer response and use efficiency for three cereal crops in Niger", *Soil Science and Plant Analysis*, vol. 32, pp. 1465-1482, 2001.
- [15] C. Charreau et P. Vidal, "Influence de l'*Acacia albida* Del. sur le sol, la nutrition minérale et les rendements des mils *Pennisetum* du Sénégal", *Agron. Trop.*, vol. 20, pp. 600-626, 1965.
- [16] M. Diouf, *Analyse de l'élaboration du rendement du mil (*Pennisetum typhoides* Stapf et Hubb.). Mise au point d'une méthode de diagnostic en parcelles paysannes*. Doctorat, INA, Paris Grignon, 1990.
- [17] F. Forest, *Intérêts et limites de l'apport de matière organique en zone soudano-sahélienne : effets sur l'alimentation hydrique et sur le rendement de cultures d'arachide et de mil*, In: IFS/CTA, Ouagadougou (Eds), *Influence du climat sur la production des cultures tropicales*, pp. 93-104, 1991.
- [18] F. Affholder, "Empirically modeling the interaction between intensification and climatic risk in semi-arid regions", *Field Crops Research*, vol. 52, pp. 79-93, 1997.
- [19] G. Vachaud, C. Dancette, M. Sonko et J. L. Thony, "Méthode de caractérisation hydrodynamique *in situ* d'un sol non saturé - Application à deux types de sol du Sénégal en vue de la détermination des termes du bilan hydrique", *Annal Agronomy*, vol. 29, pp. 1-36, 1978.
- [20] C. Dancette, "Besoins en eau du mil au Sénégal. Adaptation en zone semi-aride tropical", *Agronomie Tropicale*, vol. 38, n°. 4, pp. 267-280, 1983.
- [21] J. Cocheme et P. Franquin, *Etude agroclimatologique dans une zone semi-aride en Afrique au sud du Sahara*. Projet conjoint d'agroclimatologie FAO/UNESCO/OMM., OMM n°. 210, TP. 110, 1968.
- [22] C. Dancette, "Agroclimatologie appliquée à l'économie de l'eau en zone soudano-sahélienne", *Agronomie Tropicale*, vol. 34, n°. 4, pp. 331-355, 1979.
- [23] M. V. K. Sivakumar, "Durée et fréquence des périodes sèches en Afrique de l'Ouest" *Bulletin de recherche / ICRISAT*, vol. 13, pp. 181, 1991.
- [24] P. Louguet et D. Laffray, "Techniques d'études de l'état hydrique des plantes" *Bull. Amélior. Prod. Agr. Milieu Aride*, vol. 1, pp. 7-34, 1988.
- [25] P. K. Maiti and F. R. Bidinger, *Growth and development of the pearl millet plant*. Research Bulletin, ICRISAT, Pantacheru, A. P., India, 1981.
- [26] Do, F., and Winkel, T., *Mécanismes morpho-physiologiques de résistance du mil à la sécheresse. Intérêt d'une approche agrophysiologique et résultats expérimentaux*. In : *Le mil en Afrique : Diversité génétique et agro-physiologique. Potentialités et Contraintes pour l'amélioration génétique et l'agriculture*, vol. 283, pp. 187-204, 1993.