

Réponse Physiologique des Génotypes De Niébé [*Vigna Unguiculata* (L.) Walp.] Au Déficit Hydrique En Conditions De Lysimetre Et Performance Agronomique Au Champ

Harou Abdou^{1,2}, Hamidou Falalou^{1,2*}, Halilou Oumarou², Bacharou Falké Achirou^{1,2}, Bakasso Yacoubou¹

¹ Département de biologie, Faculté des Sciences et Techniques, Université Abdou Moumouni de Niamey, B.P. 10662, Niamey-Niger

² Institut International de Recherche sur les Cultures des zones Tropicales et Semi-Arides (ICRISAT), Centre Sahélien, B.P. 12404, Niamey-Niger

*Corresponding Author: Hamidou Falalou.

Résumé : Le niébé est la principale légumineuse vivrière cultivée au Niger. Son rendement est très faible à cause principalement de la sécheresse qui peut affecter la plante à tout le stade de son développement. Les objectifs de la présente étude sont (i) d'estimer les effets du déficit hydrique intermittent et terminal sur les paramètres agro-physiologiques et (ii) d'identifier les traits pertinents pouvant contribuer à la sélection des génotypes à haut rendement et tolérants à ces deux types de déficit hydrique. Les essais ont été conduits au lysimètre et au champ à la station expérimentale de l'ICRISAT. Le dispositif à bloc complet randomisé avec quatre répétitions a été utilisé. Pour l'expérience au lysimètre, trois traitements hydriques: témoin bien irrigué (BI), déficit hydrique intermittent (DH1) et déficit hydrique terminal (DH2). Les résultats ont montré que DH1 et DH2 ont des effets négatifs sur les paramètres étudiés. Le poids de graines a été réduit de 54% par DH1 et de 53% par DH2. Ces deux types de contrainte ont réduit la transpiration efficace respectivement de 15% et 13% et l'indice de récolte de 38% et 26%. Au niveau génotypique, les plus grandes pertes de poids de graines dues à DH1 et DH2 ont été notées au niveau de Tiligré (85% et 78% respectivement) et les plus faibles chez IT98K-1111-1 (28% et 17%). Nos résultats ont montré qu'en conditions de déficit hydrique, le principal facteur déterminant les variations de rendement sont le nombre de gousses atteignant la maturité, la transpiration efficace (TE) et l'indice de récolte (IR). IT98K-1111-1 et IT96D-610 qui ont les meilleures TE et IR se sont révélés plus tolérants. Les résultats obtenus révèlent que les génotypes sensibles ont une transpiration plus élevée par rapport aux génotypes tolérants tandis que ces derniers ont des TE et IR plus importants. L'essai au champ a confirmé la tendance agronomique observée au lysimètre.

Mots clés : Niébé, déficit hydrique, paramètres physiologiques et agronomiques, tolérance

Physiological response of cowpea [*Vigna unguiculata* (L.) Walp.] genotypes to water deficit under lysimeter conditions and agronomical performance in field conditions

Abstract: Cowpea is the main food legume grown in Niger. Its low yield is mainly due to drought stress occurring at any stage of plant development. This study aims to (i) assess the intermittent and terminal water deficit effects on agro-physiological parameters and (ii) identify relevant traits useful in breeding programs to select high yielding and drought tolerant genotypes. Field and lysimeter experiments were conducted at ICRISAT Sahelian Centre in Niger. For lysimeter experiment, three water treatments were imposed: well-water (BI), intermittent water deficit (DH1) and terminal water deficit (DH2). The results showed significant negative effects of DH1 and DH2 on investigated parameters. Thus, the seed weight decreases up to 54% and 53% due to DH1 and DH2 respectively. These stress reduced transpiration efficiency (TE) by 15% and 13% respectively, and harvest index (HI) by 38% and 26% respectively. For the genotypic variation, the highest seed weight decrease was observed on Tiligré (85% and 78% under DH1 and DH2 respectively) while IT98K-1111-1 showed the lowest seed weight decrease (28% and 17% under DH1 and DH2 respectively). Our results showed that yield variation is mainly explained by the number of matured pods, TE and HI. IT98K-1111-1 and IT96D-610 with highest TE and HI revealed drought tolerant whereas high transpiration was observed in drought sensitive genotypes. The field trial confirmed agronomical trend observed in lysimeter studies.

Key words: Cowpea, Water Deficit, Physiological and Agronomic Parameters, Tolerance.

Date of Submission: 25-06-2019

Date of acceptance: 10-07-2019

I. Introduction

Le niébé [*Vigna unguiculata* (L.) Walp.] constitue la première légumineuse alimentaire des populations vivant dans les régions désertiques du Sahel [1]. C'est aussi une des plus importantes cultures dans les zones arides et semi-arides de l'Afrique où peuvent échouer les autres cultures en raison de leur mauvaise adaptation à la sécheresse, aux températures élevées et à la pauvreté des sols ([2], [3], [4], [5]). Les principaux pays producteurs de cette légumineuse au monde sont le Nigeria, le Niger, le Burkina Faso, le Sénégal et le Mali ([6], [7]). Principale légumineuse alimentaire, le niébé est cultivé partout au Niger, du Nord au Sud, en pluvial, en irrigué et même en décrue. Ses graines, riches en protéines, servent à l'alimentation humaine et les fanes sont très prisées par le bétail. Cette culture est souvent la seule source des protéines et d'acides gras consommés par les paysans sahéliens pour combattre la faim et la malnutrition [8]. Une des principales cultures de rente au Niger ([9], [10], [11]), le niébé est bien connu pour son aptitude de fixer l'azote de l'air grâce à une association symbiotique avec les bactéries (*Rhizobium* sp.) et contribue ainsi à améliorer la fertilité des sols [12].

Malgré les multiples rôles que joue cette légumineuse, force est de constater que son rendement moyen au Niger est très faible et reste en dessous de 300 kg ha⁻¹ entre 2004 et 2014 [13]. Ce qui constitue un véritable défi à relever par la recherche. Cette faiblesse de rendement de niébé serait due à plusieurs contraintes dont les contraintes biotiques (insectes nuisibles, les maladies et les mauvaises herbes), les stress abiotiques (faible fertilité des sols, sécheresse et températures élevées), les mauvaises pratiques culturales, la mauvaise qualité des semences, les services de vulgarisation médiocres, la culture de variétés tout venant et à faible rendement. La sécheresse, qui se manifeste par une mauvaise répartition des pluies dans l'espace et dans le temps, a été considérée comme une des principales contraintes limitant le rendement de cette culture ([14], [15]). Elle

représente le principal risque au Niger, qui en a connu sept entre 1980–2010 et lesquelles ont nui à la production agricole nationale [16].

Les pertes de rendement peuvent être le résultat de sécheresses intermittentes pendant le stade végétatif, le développement ou encore pendant le stade de reproduction (sécheresse de fin du cycle de la culture). Selon plusieurs auteurs, l'impact du déficit hydrique sur niébé varie selon le génotype, le stade durant lequel le stress est intervenu mais aussi sa durée ([17], [18], [19], [20], [21]). Mais lorsque la sécheresse intervient en fin de cycle, elle cause plus de dommage car elle affecte la floraison et le remplissage des gousses entraînant ainsi une baisse plus importante du rendement ([22], [23]). Pour développer des génotypes de niébé tolérants à la sécheresse, beaucoup d'efforts ont été consentis ([24], [25], [26]). Cependant, les mécanismes mis en œuvre par les plantes pour s'adapter à la sécheresse peuvent changer avec les conditions environnementales et des génotypes jugés tolérants peuvent présenter des mécanismes différents d'adaptation au déficit hydrique [25]. Ainsi, malgré les efforts consentis pour atténuer les effets du déficit hydrique sur le niébé au Niger ([27], ([28], ([8], ([29]). beaucoup reste à faire pour rehausser son rendement. La nouveauté de la présente étude est donc d'investiguer les mécanismes mis en jeux par la plante pour faire face à ce type de contrainte hydrique en utilisant un système de lysimètre constitué de gros tubes en PVC offrant à la plante des conditions similaires à celles du champ, et où les effets des traitements hydriques peuvent être étudiés. Cette méthode offre la possibilité d'évaluer avec précision certains paramètres physiologiques qui seraient difficiles voire impossible d'être déterminés au champ ([30], [31], [32]). Elle permet aussi d'obtenir des données agro-physiologiques très pertinentes dans un système où l'homogénéité du sol et l'irrigation peuvent être contrôlées, ce qui n'est pas le cas avec les autres méthodes. Un tel système a récemment été utilisé pour évaluer l'utilisation de l'eau tout au long du cycle de culture et a produit des données très pertinentes ([33], [34], [27]). L'utilisation de cette méthode a permis de déterminer la transpiration efficace afin de distinguer les génotypes tolérants et sensibles ([35], [36], [33]). La première hypothèse de ce travail est que les déficits hydriques intermittent et terminal affecteraient l'indice de récolte, la transpiration et la transpiration efficace (TE) des génotypes de niébé, ce qui pourrait expliquer en partie les différences génotypiques dans la réalisation de rendement final en conditions de stress hydrique.

Les objectifs de ce travail étaient (i) d'évaluer l'effet du déficit hydrique sur les paramètres agro-physiologiques de six génotypes de niébé qui se sont révélés contrastés pour le rendement en graines dans des conditions de déficit hydrique au champ ; (ii) d'identifier les traits pertinents impliqués dans la réalisation de rendement élevé en graines et dans la tolérance aux déficits hydriques intermittent et terminal ; et (iii) voir si les résultats obtenus au lysimètre confirment ceux du champ.

II. Matériel et méthodes

Site de l'étude et matériel végétal: Les essais au lysimètre et au champ ont été conduits dans la station expérimentale de l'ICRISAT Centre sahélien (ISC) de Sadoré située à 45 km au sud de la ville de Niamey entre 13°15' de latitude Nord et 2°18' de longitude Est. Dans l'essai au lysimètre, six génotypes (KVX-61-1, Tiligré, Gourgou, Dan-Ila, IT98K-1111-1 et IT96D-610) ont été évalués. A ces 6 génotypes, 19 autres ont été ajoutés et testés au champ en hivernage. Quelques caractéristiques de ces génotypes sont consignées dans le tableau 1. Les caractéristiques physico-chimiques des sols utilisés au champ et au lysimètre sont entre autres : forte teneur en sable (90%), pH-H₂O (5,28), faible capacité d'échange cationique (1,91 cmol+ kg⁻¹), faible matière organique (0,22%), faible teneur en azote total (204,3 mg-N kg⁻¹), faible teneur en phosphore total (26,25 mg-P kg⁻¹) et en phosphore assimilable ou P bray-1 (1,83 mg-P kg⁻¹).

Tableau 1: Quelques caractéristiques des génotypes étudiés ([20], [29])

Nom	Origine	Cycle semi-maturité	Couleur graines	Taille graines	Résistance à la sécheresse
Tiligré (KVX-775-33-2G)	INRA, Burkina Faso	70 jours	Blanche	Grosse	Tolérante
Komcallé (KVX-442-3-25-SH)	INRA, Burkina Faso	60 jours	Blanche	Grosse	Tolérante
GOURGOU (TZ1)	INRA, Burkina Faso	75 jours	Blanche	Grosse	Tolérante
KVX-61-1 (Bengsiido)	INRA, Burkina Faso	65-68 jours	Bigarée	Moyenne	Tolérante
Nafi (KVX-771-10G)	INRA, Burkina Faso	67 jours	Blanche	Grosse	Résistante
KVX-414-22-2	INRA, Burkina Faso	70 jours	Blanche	Grosse	Résistante
KVX-525	INRA, Burkina Faso	74-77 jours	Blanche	Petite	Sensible
KVX-403	INRA, Burkina Faso	71-75 jours	Blanche	Grosse	sensible
IT98K-1111-1	IITA, Nigeria	59-63 jours	Blanche	Grosse	Tolérante
IT96D-610	IITA, Nigeria	70-74 jours	Rouge	Grosse	Tolérante
IT97K-556-6	IITA, Nigeria	72-75 jours	Rouge	Grosse	Sensible
IT82E-18	IITA, Nigeria	60-66 jours	Rouge	Grosse	Sensible
IT93D-442	IITA, Nigeria	76-79 jours	Rouge	Petite	Sensible
IT99K-124-5	IITA, Nigeria	71-75 jours	Blanche	Grosse	Tolérante
IT93K-2046	IITA, Nigeria	70-74 jours	Blanche	Grosse	Sensible
IT90K-284-2	IITA, Nigeria	70-72 jours	Rouge	Petite	Sensible
IT98K-1282	IITA, Nigeria	74-77 jours	Blanche	Grosse	Tolérante

IT00K-901-6	IITA, Nigeria	74-79 jours	Blanche	Grosse	Tolérante
Mélakh	ISRA, Sénégal	65-69 jours	Blanche	Grosse	Tolérante
Mougne	ISRA, Sénégal	72-75 jours	Gris-bleu	Grosse	Tolérante
Mouride	ISRA, Sénégal	66-70 jours	Blanche	Moyenne	Tolérante
58-57	ISRA, Sénégal	62-69 jours	Blanche	Petite	Tolérant
Yacine	ISRA, Sénégal	68-71 jours	marron	Grosse	Sensible
Apagbaala	Ghana	63-68 jours	Blanche	Grosse	Sensible
Dan-Ila	Local, Niger	-	Blanche	Petite	Tolérante

Description du système lysimètre: C'est un système constitué des fausses de 1 m de profondeur dans lesquelles sont installés verticalement des tubes PVC (en Polychlorure de vinyle) d'une longueur de 130 cm et de 25 cm de diamètre. Une assiette en fer de 2 mm d'épaisseur a été placée et soutenue par quatre vis parquer au bas des tubes pour maintenir le sol tout en permettant le drainage de l'eau. Chaque cylindre est équipé des colliers métalliques et d'anneaux qui permettent de le soulever lors des pesées de la transpiration. Afin d'imiter les conditions du champ, les cylindres sont remplis avec 2 types de sols : les 100 premiers centimètres de la base des tubes sont remplis avec le sol de profondeur prélevé entre 20-100 cm alors que les 20 cm qui les suivent sont remplis avec le sol de surface prélevé entre 0 et 20 cm de profondeur. Ces sols ont été prélevés du champ dans lequel les 25 génotypes ont été évalués. Les 10 derniers centimètres des tubes sont laissés vides pour permettre l'arrosage et l'application d'une couche des granules au moment d'application de stress hydrique.

Evaluation au lysimètre de six génotypes en réponse au déficit hydrique intermittent et terminal : L'essai a été conduit entre Septembre et Novembre 2017. Après remplissage, les tubes ont été arrosés à la capacité au champ et le lendemain après drainage, trois graines ont été semées par tube dans trois poquets à 3 cm de profondeur. Les plants ont été démarrés à 2 plants par tube au 10^{ème} jour après semis (JAS). Le démarrage a été suivi d'une application de 3 g de Di-Ammonium Phosphate (DAP) par tube au 14^{ème} JAS. Au 24^{ème} JAS, un des deux plants de chaque tube a été extirpé en ne laissant qu'un seul plant. Le dispositif expérimental est un dispositif en bloc complet randomisé avec quatre (4) répétitions. Les facteurs mis en jeu sont : le régime hydrique (3) comme facteur principal et le génotype (6) comme facteur secondaire randomisé dans chaque traitement hydrique. Les trois régimes hydriques sont : bien irrigué ou traitement témoin (BI) ; déficit hydrique intermittent (DH1) et déficit hydrique terminal (DH2). L'application du DH1 a consisté à interrompre l'irrigation jusqu'à ce que la majorité des plantes montrent des symptômes nets de flétrissement avant d'être arrosées puis interruption de l'irrigation à nouveau, ce cycle se poursuit jusqu'à la maturité de gousses. En ce qui concerne DH2, il a été imposé lorsque 50% des plants d'un même génotype ont atteint la floraison et son application consisté à suspendre définitivement l'irrigation jusqu'à la récolte.

Evaluation au champ des paramètres de vingt-cinq génotypes : L'expérimentation conduite au champ, elle a été réalisée entre Juin et Septembre 2018. La préparation du terrain a consisté en un labour profond (15 cm) suivi d'un hersage à sec. Le sol a été ensuite fertilisé avec de l'engrais NPK 15-15-15 (en raison de 200 kg ha⁻¹). Le dispositif expérimental utilisé est un split plot à quatre répétitions. Au sein de chaque répétition, il y a 25 parcelles élémentaires d'une superficie de 2 m x 1 m = 2 m² espacées de 2 m. Chaque parcelle élémentaire comporte 2 lignes. Les écartements entre les lignes et les poquets sont respectivement de 20 cm et 50 cm soient 10 poquets par ligne. Un seul facteur (génotype) est mis en jeu.

Mesure des paramètres agro-physiologiques :

Les données climatiques (température et humidité relative) ont été relevées durant les essais. Les dates de levée, début floraison, 50% floraison et début maturité des gousses ont été observées. Le plant extirpé au 24^{ème} JAS (deuxième démarrage) a été séché et pesé pour déterminer la biomasse initiale de chaque génotype à la veille de l'application de déficit hydrique. Durant le déficit hydrique au lysimètre, la transpiration a été mesurée par gravimétrie à l'aide des pesées régulières des tubes. Comme il n'y avait ni évaporation, ni drainage, la différence de deux poids consécutifs de tubes, plus l'eau ajoutée après la pesée précédente, était équivalente à la transpiration [33]. Les quantités totales d'eau transpirée (ETT) des plantes sous les trois traitements hydriques entre l'imposition de DH1 et la récolte ont été déterminées. La transpiration journalière (Tjr) durant la période de DH1 et DH2 a été déduite en faisant le rapport entre la quantité d'eau totale transpirée pendant la période de stress (Ts) et le nombre de jours de stress (Njs) vécu par la plante : $Tjr = Ts/Njs$. A la maturité, les gousses et la partie aérienne de chaque plante ont été récoltées et mises au séchage au soleil (sous serre) pendant deux semaines pour déterminer la biomasse totale (BT) correspondant à la somme de la biomasse aérienne par plant (Bfne) et le poids de gousses par plant (Pgse). La transpiration efficace (TE) a été calculée comme suit : $TE = (BT - BI) / ETT$. La teneur en chlorophylle de feuilles (SCMR) a été déterminée à l'aide d'un appareil minolta SPAD-502 (Spectrum Technology Inc., IL, USA). La mesure de SCMR a été effectuée au 20^{ème} jour après application de DH1 sur la feuille de rang 3 à compter de l'apex. Quant à la température de la canopée (TC), elle a été mesurée à l'aide d'une caméra infra-rouge (IR FlexCam Thermal Imager, Fluke Ti55FT-20/7.5, IR-Fusion,

600°C, 20 mm, 7.5 Hz). Les images thermiques ont été prises à 2m au-dessus du couvert végétal à l'heure où la VPD est élevée (entre 12h30 et 14h30). Cette mesure a été effectuée le même jour que celle de SCMR. Le logiciel SmartView (Fluke Thermography Everett, WA, USA) a été utilisé pour analyser ces images et déterminer la température de la canopée. En ce qui concerne les paramètres agronomiques, au lysimètre il a été déterminé la biomasse aérienne par plant (Bfne pt^{-1}), le nombre de gousses par plant (Ngse pt^{-1}), le poids gousses par plant (Pgse pt^{-1}), le poids graines par plant (Pgrs pt^{-1}) et le poids de 100 graines par génotype dans chacun des traitements hydriques. L'indice de récolte (IR) a été déterminé en faisant le rapport entre Pgse et la biomasse totale (IR= Pgse/BT). Au champ, la récolte a été faite dans un carré de rendement de 1 m². Ce sont les plants qui se trouvent au milieu de la parcelle qui sont concernés. Les fanes et les gousses après récolte ont été séchées au soleil (sous serre) pendant deux semaines. Après séchage, elles ont été pesées puis les gousses décortiquées pour déterminer le poids de graines par m² de chaque génotype.

Analyse statistique des données : Les données collectées ont été soumises à une analyse de la variance à l'aide du logiciel GenStat 14^{ème} édition. Le même logiciel a été utilisé pour effectuer le test de corrélation de Pearson. Les histogrammes ont été construits avec le tableur Excel (Microsoft Office Excel 2016), en utilisant les moyennes enregistrées à partir de 4 répétitions par génotype.

III. Résultats

Effets de déficit hydrique sur les paramètres physiologiques au lysimètre

- Transpiration journalière et transpiration efficiente

L'ANOVA de la transpiration journalière durant la période de DH1 (Figure 1) a révélé une différence significative entre le régime hydrique ($P < 0,001$) mais la différence n'est pas significative entre les génotypes. DH1 a réduit de manière significative la transpiration journalière, 448 ml pour DH1 contre 948 ml pour BI. Durant DH2 (Figure 2), l'analyse de la variance a montré un effet régime hydrique ($P < 0,001$) et une variation génotype significative ($P = 0,001$) mais l'interaction GxRH n'est pas significative ($P = 0,074$). DH2 a réduit la transpiration journalière des plants stressés par rapport à leurs témoins, 497 ml pour DH2 contre 744 ml pour BI, soit une baisse moyenne de 33%. Les résultats montrent que le génotype IT98K-1111-1 a connu les plus importantes diminutions de la transpiration sous DH1 (60%) et DH2 (46%). La figure 3 montre l'évolution de la transpiration cumulée des génotypes testés au niveau de trois régimes hydriques. A la fin de l'essai soit 39 jours après imposition du stress (JAIS), Gourgou, KVX-61-1 et Tiligré se sont classés parmi les trois premiers génotypes à quantité d'eau totale transpirée élevée alors que IT98K-1111-1 a présenté des faibles valeurs de quantité d'eau totale transpirée sous traitements DH1 et DH2.

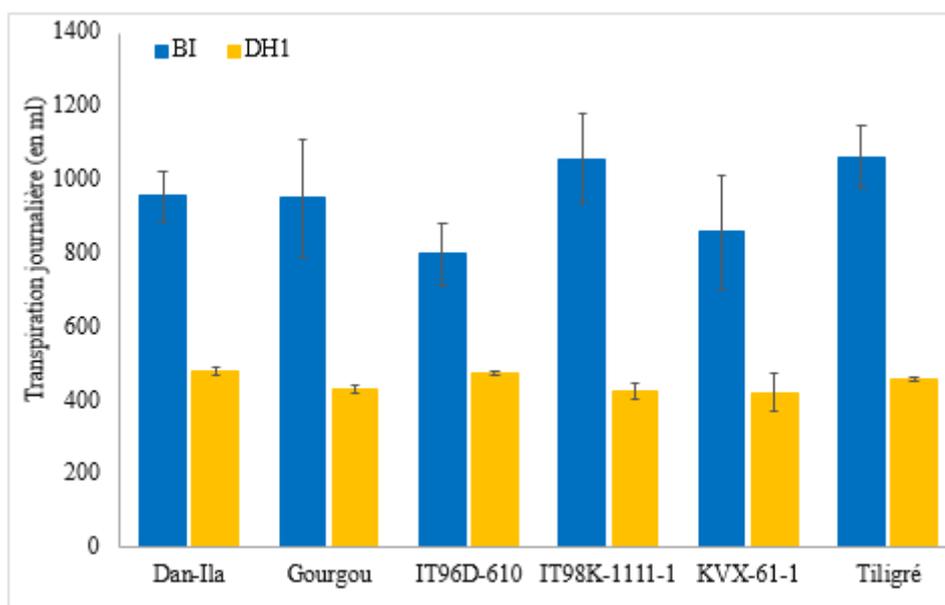


Figure 1: Transpiration moyenne journalière durant la période DH1 chez les 6 génotypes de niébé

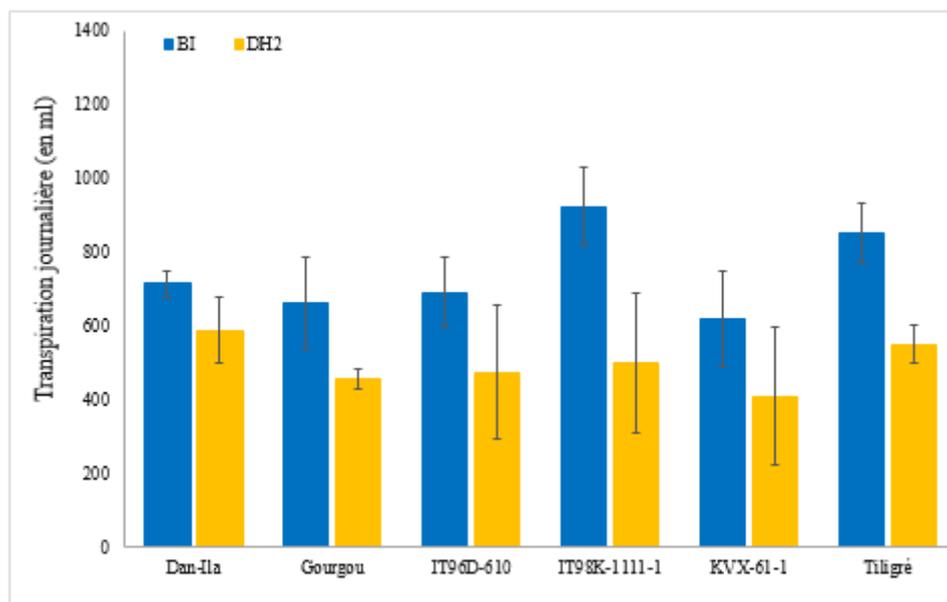


Figure 2: Transpiration moyenne journalière durant la période DH2 chez les 6 génotypes de niébé

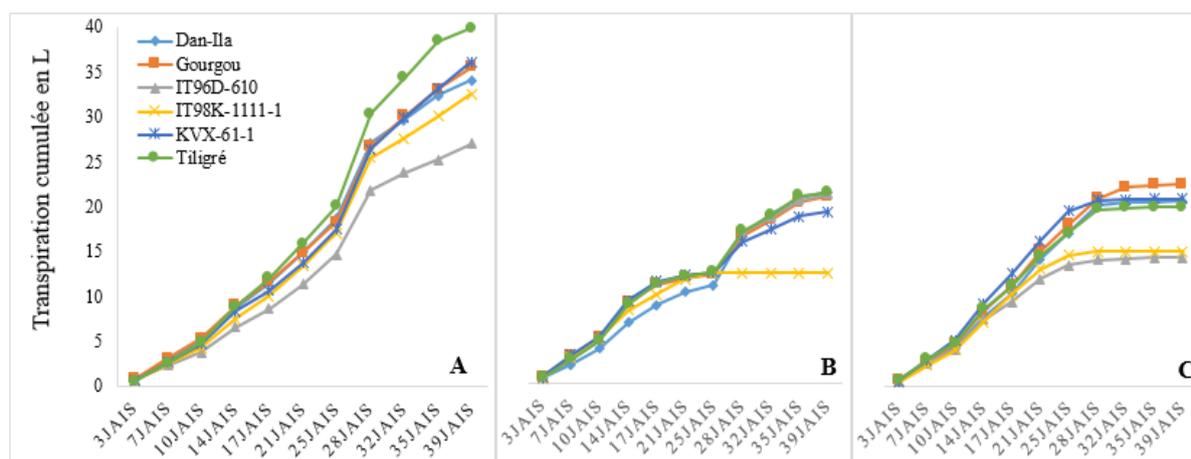


Figure 3: Evolution de la transpiration cumulée (en litre) des plants en fonction du nombre de jours après imposition du déficit hydrique intermittent (JAIS) chez les six génotypes de niébé. Avec A= transpiration en conditions bien irrigué (BI) ; B= transpiration en conditions du déficit hydrique intermittent (DH1) ; C= transpiration en conditions du déficit hydrique terminal (DH2)

- Température de la canopée (TC) et teneur en chlorophylle des feuilles (SCMR)

Au 20^{ème} jour après imposition de DH1 (JAIS), la température de l'air (T_{air}) observée au moment des mesures de la température de la canopée (TC) était de 37,36°C. Au niveau des plantes, les TC enregistrées étaient en moyenne de 36,11°C au niveau du traitement BI, 45,96°C sous DH1 et 40,03°C sous DH2. Ainsi, la TC des plantes non stressées était en moyenne de 1,25°C inférieure à celle de l'air alors que celles des plantes stressées (DH1 et DH2) étaient respectivement de 8,60°C et 2,67°C supérieures à la T_{air} . Les résultats de l'analyse statistique n'ont pas montré de différences significatives entre les génotypes ($P > 0,05$) mais un effet régime hydrique (RH) significatif (Figure 4). Les TC des plants sous traitements DH1 et DH2 ont connu une augmentation respectivement de 21% et de 13% par rapport à celle des plants non stressés. En ce qui concerne SCMR, l'ANOVA montre que les génotypes Tiligré et IT96D-610 ont la plus forte teneur en chlorophylle des feuilles (Figure 5). Les résultats révèlent que DH1 et DH2 ont entraîné des réductions de la teneur en chlorophylle des feuilles de 21% et de 9% Respectivement. Les résultats montrent que les génotypes les plus affectés par DH1 sont Tiligré (34%) et IT98K-1111-1 (29%) tandis que K VX-61-1 (13%) et Dan-Ila (12%) ont été les moins affectés par DH2.

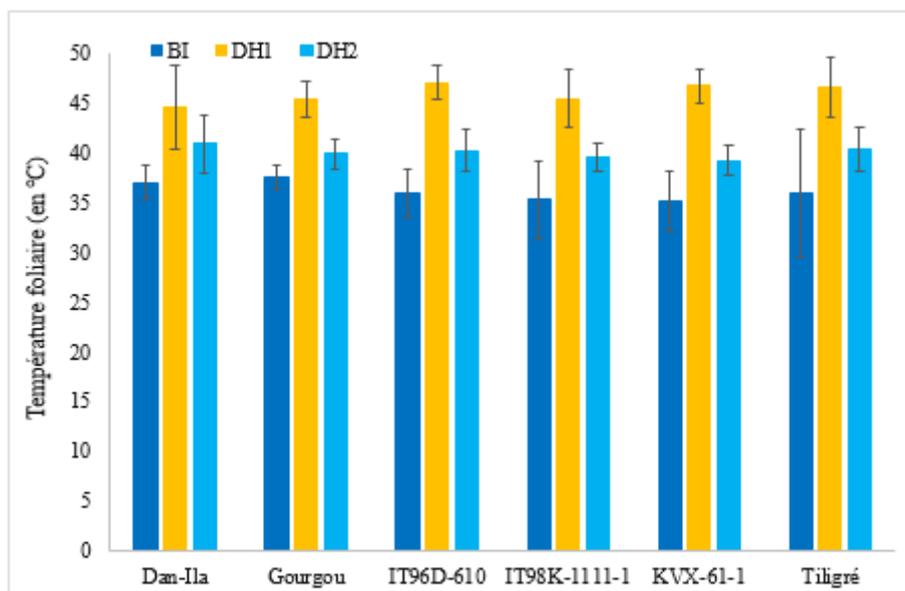


Figure 4: Température de la canopée (en °C) au 20^{ème} JAIS chez le six génotypes sous régime hydrique bien irrigué (BI), déficit hydrique intermittent (DH1) et déficit hydrique terminal (DH2).

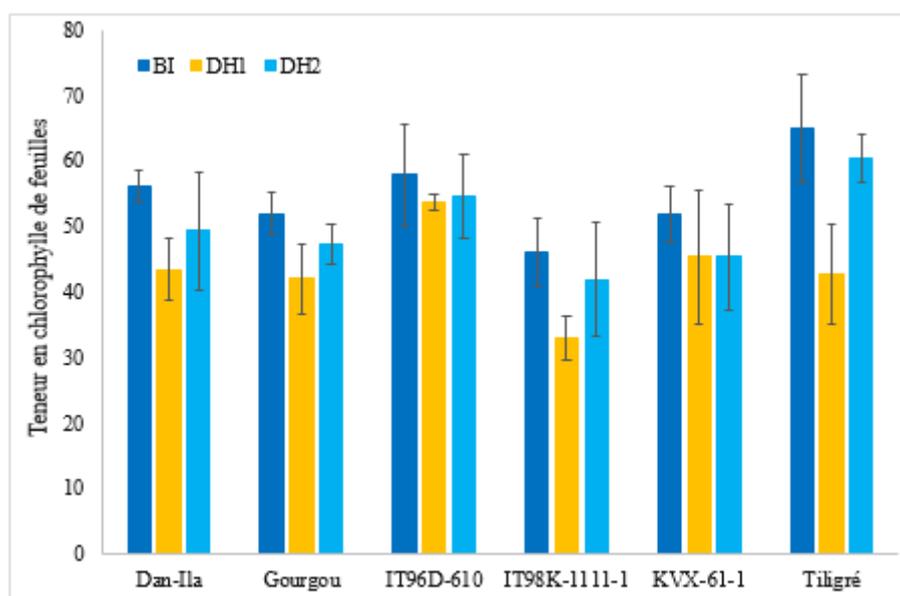


Figure 5: Teneur en chlorophylle des feuilles chez les génotypes au 25^{ème} JAIS. Avec BI= régime hydrique bien irrigué; DH1= traitement déficit hydrique intermittent; DH2= traitement hydrique terminal.

- Effets de déficit hydrique sur les composantes de rendement, l'indice de récolte (IR) et transpiration efficace (TE) au lysimètre

Le tableau 2 montre certaines composantes de rendement chez les six génotypes de niébé en conditions de DH1 et de DH2. La biomasse des fanes par plant (Bfne pt⁻¹) de l'ensemble des génotypes est de 27,63 g sous traitement BI, 16,52 g sous DH1 et 15,45 g en conditions DH2 soient des diminutions de 40% et 44% respectivement. D'une manière générale, la biomasse sèche aérienne par plant la plus élevée a été observée chez Tiligré (25 g) et la plus faible chez IT98K-1111-1 (16 g). Concernant le nombre de gousses par plant (Ngse pt⁻¹), nos résultats ont montré que DH1 et DH2 l'ont réduit de 35% et 40% respectivement. Outre la réduction de nombre de gousses par plant, DH1 et DH2 se sont aussi traduits par des réductions significatives du poids de 100 graines. Les résultats révèlent que le poids de 100 graines a été réduit respectivement de 25% et de 22% par DH1 et DH2. Tiligré et KVX-61-1 ont été les plus affectés en présentant les plus faibles poids de 100 de graines en conditions DH1 et DH2 (Figure 6). L'analyse des poids de gousses par plant (Pgse pt⁻¹) et de graines par plant (pgrs pt⁻¹) n'a pas montré de différence significative entre les génotypes (Tableau 2) mais a révélé un effet

RH significatif ($P < 0,001$). Toutefois, les résultats montrent que les génotypes IT98K-1111-1, K VX-61-1 et IT96D-610 ont les meilleures valeurs sous les trois RH. Le Pgrs pt⁻¹ a été négativement affecté chez tous les génotypes par DH1 et DH2 qui ont entraîné des pertes moyennes de 60% et 57% respectivement. Au niveau génotypique, Tiligré (85%) et Gourgou (70%) ont été les plus affectées par DH1 tandis que Tiligré (78%) et K VX-61-1 (73%) se sont montrées plus affectées par DH2. IT98K-1111-1 et IT96D-610 se révèlent tolérants aux deux types de déficit hydrique.

La figure 7 montre que le génotype IT98K-1111-1 a l'indice de récolte le plus important sous les trois RH. DH1 et DH2 ont entraîné des réductions de IR de 38% et 26% respectivement. K VX-61-1 (49%), Gourgou (35%) et Dan-Ila (28%) ont été les plus affectés par DH2 alors que IT96D-610 (66%) et Dan-Ila (44%) se montrent plus sensibles au DH1. En ce qui concerne la transpiration efficace, l'ANOVA a montré une variation génotypique significative ($P = 0,017$). IT98K-1111-1 et IT96D-610 ont les meilleures valeurs moyennes de la TE tandis que Gourgou la plus faible TE (Figure 8). DH1 et DH2 ont négativement affecté la TE en la réduisant respectivement de 15% et 13%. K VX-61-1 a été le plus affecté par DH1 (29%) alors que le génotype le moins affecté par le même déficit hydrique est IT96D-610 (10%). IT98K-1111-1 est le seul génotype qui a connu une légère augmentation (5%) de sa TE en conditions DH1 (Figure 8). Les génotypes qui ont subi les plus grandes diminutions de leurs TE sous l'effet de DH2 sont Dan-Ila (31%) et K VX-6-1 (28%).

Tableau 2: Composantes de rendement de six génotypes de niébé sous traitements de bonne irrigation (T0), de déficit hydrique intermittent (T1) et de déficit hydrique terminal (T2) au lysimètre. Bfne pt-1 = biomasse des fanes par plant; Ngse pt-1 = nombre de gousses par plant; Pgse pt-1 = poids de gousses par plant; Pgrs pt-1 = poids de graines par plant

Genotype	Bfne pt ⁻¹ (g)			Ngse pt ⁻¹			Pgse pt ⁻¹ (g)			Pgrs pt ⁻¹ (g)		
	BI	DH1	DH2	BI	DH1	DH2	BI	DH1	DH2	BI	DH1	DH2
Dan-Ila	26,90	17,80	15,57	6,25	7,25	3,00	9,53	4,02	3,38	7,71	3,03	2,66
Gourgou	25,87	15,93	16,87	6,00	2,25	2,25	9,69	3,23	4,14	7,44	2,25	3,15
IT96D-610	22,27	19,97	13,30	8,25	6,00	6,25	9,96	5,66	6,69	7,99	4,55	5,10
IT98K-1111-1	23,16	10,96	12,55	11,25	6,50	9,50	15,23	7,42	7,76	8,11	5,81	6,72
K VX-61-1	29,26	14,75	17,35	12,50	8,75	5,00	15,67	5,62	4,29	12,37	4,45	3,33
Tiligré	38,33	19,69	17,05	7,75	3,00	5,00	12,41	2,36	3,81	9,48	1,38	2,11
Mean	27,63	16,52	15,45	8,67	5,63	5,17	12,08	4,72	5,01	8,85	3,58	3,84
G (F-prob)	0,006			0,004			0,152			0,401		
RH (F-prob)	<0,001			0,004			<0,001			<0,001		
GxRH (F-prob)	0,204			0,589			0,927			0,843		

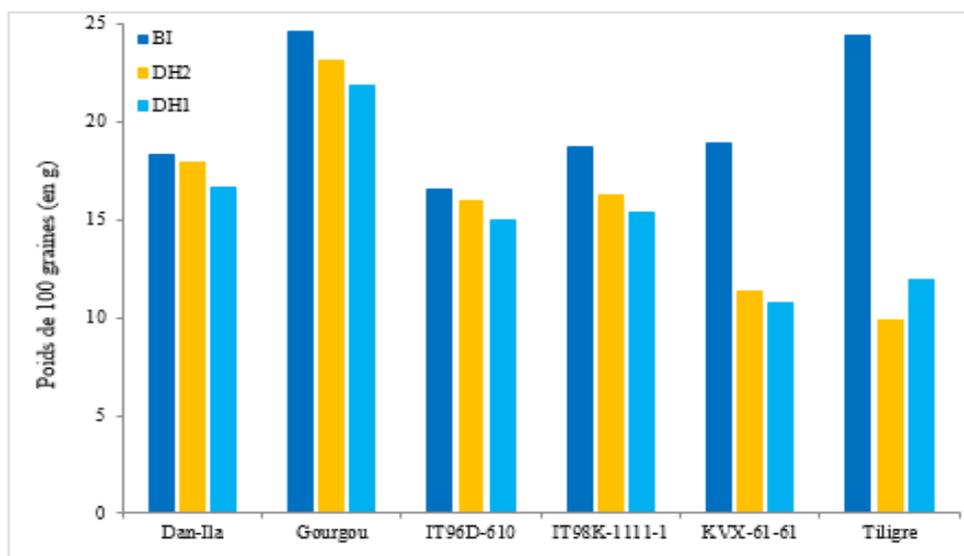


Figure 6: Poids de 100 graines chez les six génotypes en conditions de traitement hydrique bien irrigué (BI) ; traitement déficit hydrique intermittent (DH1) et traitement déficit hydrique terminal (DH2)

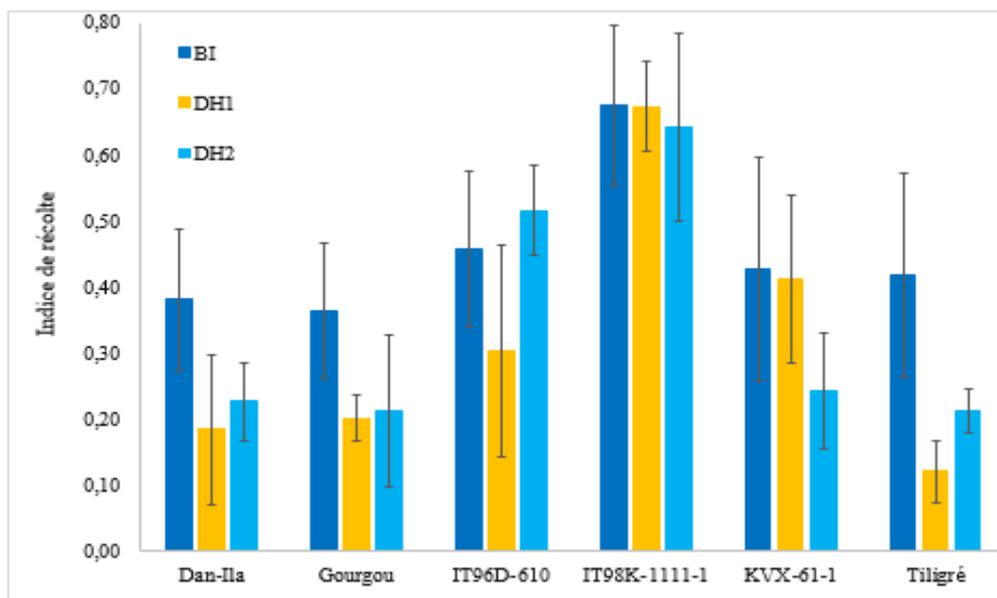


Figure 7: Indice de récolte chez les six génotypes en conditions de traitement hydrique bien irrigué (BI) ; traitement déficit hydrique intermittent (DH1) et traitement déficit hydrique terminal (DH2)

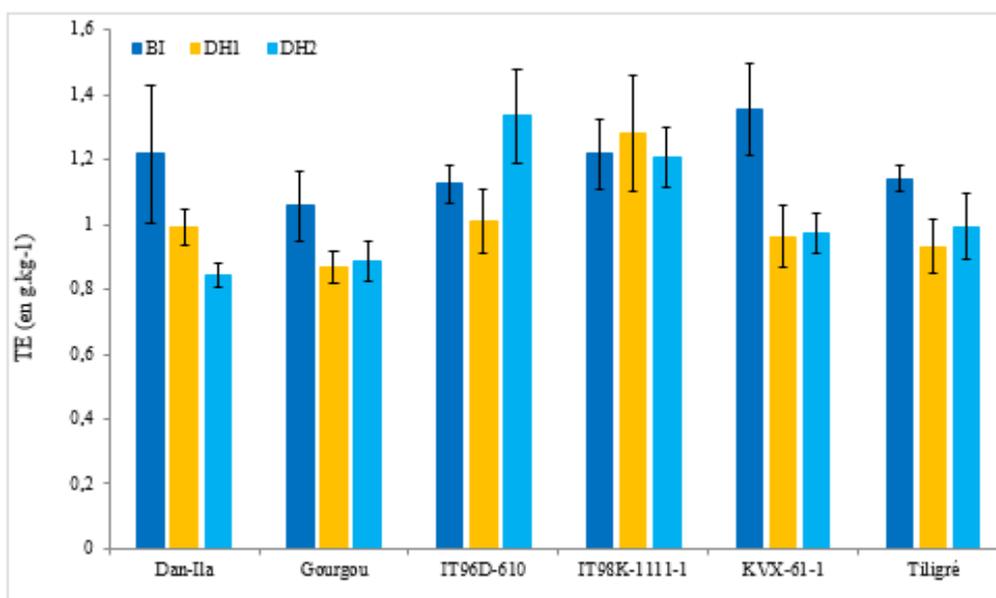


Figure 8: Transpiration efficace (TE) chez les six génotypes en conditions de traitement hydrique bien irrigué (BI) ; de déficit hydrique intermittent (DH1) et de déficit hydrique terminal (DH2).

- Corrélation entre les paramètres étudiés au lysimètre

Les données des corrélations entre les paramètres étudiés sont présentées dans le tableau 4. En conditions DH1, le SPAD est positivement et significativement associé à la Bfne ($r = 42$), à l'ETT ($r = 40$) mais négativement associé à l'IR ($r = -0,15$). Dans les conditions DH2, les résultats ont montré des corrélations négatives entre la teneur en chlorophylle (SPAD) et la TC ($r = -0,20$), la Bfne ($r = -0,20$), le Pgrs ($r = -0,20$), la TE ($r = -0,16$) et l'IR ($r = -0,12$). Dans les trois traitements hydriques, la TC est négativement associée aux composantes de rendement (Ngse pt^{-1} , Pgse pt^{-1} et Pgrs pt^{-1}), à la TE et à l'IR. La Bfne pt^{-1} est significativement corrélée à l'ETT pt^{-1} dans les trois traitements hydriques mais négativement associée au Ngse pt^{-1} , Pgse pt^{-1} , Pgrs pt^{-1} et à l'IR. Dans les trois conditions hydriques, les résultats ont montré des fortes corrélations entre la TE et l'IR avec le Ngse pt^{-1} , le Pgse pt^{-1} et le Pgrs pt^{-1} . L'IR est en revanche négativement associé à la Bfne pt^{-1} . La corrélation entre l'eau totale transpirée et les composantes de rendement n'est positive qu'en conditions BI (Tableau 3).

Tableau 3: Corrélation entre les paramètres agro-physiologiques étudiés. Avec SPAD= teneur en chlorophylle de feuilles; TC = température de la canopée; Bfne pt-1= biomasse fanes par plant; Ngse pt-1 = nombre de gousses par plant; Pgse pt-1= poids gousses par plant; Pgrs pt-1 = poids graines par plant; ETT pt-1 = eau totale transpirée par plant; TE = transpiration efficace; IR = indice de récolte

	SPAD	TC	Bfne pt ⁻¹	Ngse pt ⁻¹	Pgse pt ⁻¹	Pgrs pt ⁻¹	ETT pt ⁻¹	TE	IR
Traitement témoin (BI)									
SPAD	-								
TC	-0,31	-							
Bfne pt ⁻¹	0,14	0,01	-						
Ngse pt ⁻¹	0,13	-0,18	-0,07	-					
Pgse pt ⁻¹	0,01	-0,14	-0,04	0,93***	-				
Pgrs pt ⁻¹	0,08	-0,07	-0,10	0,77***	0,87***	-			
ETT pt ⁻¹	0,11	0,05	0,45*	0,36	0,41*	0,40*	-		
TE	0,12	-0,18	0,55*	0,32	0,37	0,24	-0,09	-	
IR	0,01	-0,09	-0,40*	0,75***	0,83***	0,76***	0,13	0,22	-
Traitement déficit hydrique intermittent (DH1)									
SPAD	-								
TC	0,16	-							
Bfne pt ⁻¹	0,42*	0,03	-						
Ngse pt ⁻¹	0,03	-0,06	-0,07	-					
Pgse pt ⁻¹	0,03	-0,33	-0,33	0,67***	-				
Pgrs pt ⁻¹	0,07	-0,30	-0,33	0,64***	0,99***	-			
ETT pt ⁻¹	0,40*	-0,04	0,75***	-0,17	-0,38	-0,37	-		
TE	0,03	-0,25	0,01	0,53**	0,74***	0,72***	-0,46*	-	
IR	-0,15	-0,23	-0,64***	0,52**	0,88***	0,87***	-0,71***	0,67***	-
Traitement déficit hydrique terminal (DH2)									
SPAD	-								
TC	-0,20	-							
Bfne pt ⁻¹	-0,15	0,25	-						
Ngse pt ⁻¹	-0,10	-0,11	-0,09	-					
Pgse pt ⁻¹	-0,12	-0,39	-0,12	0,71***	-				
Pgrs pt ⁻¹	-0,20	-0,32	-0,19	0,74***	0,95***	-			
ETT pt ⁻¹	0,01	0,04	0,59**	-0,48*	-0,33	-0,38*	-		
TE	-0,16	-0,09	0,22	0,65***	0,68***	0,64***	-0,52**	-	
IR	-0,12	-0,43	-0,48*	0,63**	0,87***	0,86***	-0,58**	-0,57**	-

*=coefficient de corrélation de Pearson significatif à 5% ; **coefficient de corrélation de Pearson significatif à 1% ; ***coefficient de corrélation de Pearson significatif à 1%.

Tableau 4: Rendements moyens (\pm écart type) des fanes, des gousses et des graines de 25 génotypes de niébé cultivés au champ.

Génotypes	Rendement fanes (kg ha ⁻¹)	Rendement gousses (kg ha ⁻¹)	Rendement graines (kg ha ⁻¹)
58-57	3563±686	877±187	375±86
Apagbaala	4101±1094	304±119	113±43
Dan-Ila	9625±1300	1462±404	602±104
Gourgou	8175±1931	1606±728	910±387
IT00K-901-6	4075±483	614±177	354±105
IT82E-18	4975±1300	780±340	327±181
IT90K-284-2	4575±1715	653±309	200±65
IT93D-442	6988±2645	828±423	416±236
IT93K-2046	2500±571	688±300	352±162
IT96D-610	5850±2800	1181±370	702±267
IT97K-556-6	4863±1179	702±278	276±122
IT98K-1111-1	3391±610	1171±77	614±58
IT98K-128-2	5063±1270	885±173	405±96
IT99K-124-5	3775±572	634±198	417±96
Komcallé	3875±244	513±143	229±62
KVX-403	4700±621	288±113	151±66
KVX-414-22-2	9070±1769	986±233	485±152
KVX-525	5488±1438	1437±337	892±194
KVX-61-1	9825±582	1476±250	680±91
Mélakh	2850±560	683±119	389±68
Mougne	6138±1469	840±223	381±192
Mouride	5075±1114	837±260	249±46
Nafi	5175±734	554±168	308±100
Tiligré	12238±1395	1671±269	838±146

Yacine	8200±1812	798±293	470±160
Signification	<0,001	0,069	0,016

- Variation génotypique sur les rendements fanes, gousses et graines au champ

Les résultats des rendements fanes, gousses et graines enregistrés au champ chez les 25 génotypes sont présentés dans le tableau 4. L'analyse des résultats montre des différences significatives entre les génotypes pour les rendements fanes ($P < 0,001$) et graines ($P = 0,016$). La variation génotypique révèle que les génotypes Gourgou, Tiligré, K VX-61-1, Dan-Ila, K VX-414-22-2 et Yacine sont les plus performants. K VX-525, IT96D-610 et IT98K-1111-1 se sont classés parmi les génotypes à important rendement graines mais faible au niveau de la production des fourrages. Apagbaala, IT90K-284-2, Komcallé, IT97K-556-6, IT82E-18, IT93K-2046, Mélakh et Nafi se sont figurés parmi les génotypes à faibles rendements fanes et graines.

IV. Discussion

Les résultats obtenus ont montré que le déficit hydrique intermittent (DH1) et terminal (DH2) ont négativement affecté la transpiration des génotypes étudiés. Une variation génotypique dans la réponse à ces deux types de stress dus au déficit hydrique a été observée. Le génotype IT98K-1111-1 a montré une floraison précoce et a vite bouclé son cycle avant que les effets de DH1 et DH2 ne soient sévères. Cette stratégie d'adaptation observée chez IT98K-1111-1 est l'évitement à la sécheresse qui permet à la plante de ne pas subir les effets sévères du déficit hydrique. La même stratégie d'adaptation a été observée chez le génotype IT96D-610 sous DH2. Nos résultats ont montré que le déficit hydrique intermittent et terminal ont négativement affecté la transpiration journalière durant la période de stress en la diminuant respectivement de 53% et 33%. D'autres auteurs ([37], [27], [25]) ont trouvé des baisses considérables de la transpiration sous l'effet de la sécheresse. Cette réduction de la transpiration serait due à la fermeture des stomates afin de minimiser la perte de l'eau par transpiration. Elle peut aussi être attribuée à la diminution de la surface transpirante ([38], [39], [29]). Parmi les génotypes étudiés, IT98K-1111-1 est celui qui a plus réduit sa transpiration dans les conditions de DH1 et DH2 (64% et 56% respectivement). Ce génotype est suivi par IT96D-610 en conditions DH2. Les résultats obtenus ont montré que la diminution de la transpiration est suivie par une augmentation de la température de la canopée (TC) et d'une réduction de la teneur en chlorophylle des feuilles. Comparativement à la température de l'air ($T_{air} = 37,36^{\circ}\text{C}$), la température des plants soumis au DH1 et DH2 étaient respectivement de $8,60^{\circ}\text{C}$ et $2,67^{\circ}\text{C}$ supérieures à la T_{air} alors que celle des plants témoins était de $1,25^{\circ}\text{C}$ inférieure à celle de l'air. Selon [40], l'élévation de la TC en conditions du déficit hydrique peut s'expliquer par la diminution de la transpiration suite à la fermeture des stomates. En effet, la fermeture des stomates qui limite la transpiration élève la température du feuillage consécutivement à l'augmentation de la température interne de la plante. La plante, en fermant ses stomates pour limiter les pertes d'eau par transpiration, se trouve confrontée à une limitation de la photosynthèse et à un échauffement des feuilles conduisant à une réduction de la synthèse et de l'accumulation de la matière organique ainsi qu'à la brûlure des feuilles.

Outre leurs effets dépressifs sur les caractères physiologiques, les déficits hydriques DH1 et DH2 appliqués ont négativement affectés les composantes de rendement. En effet, les résultats obtenus révèlent que le poids de graines par plant a été réduit de 60% et de 57% respectivement par DH1 et DH2. Cette forte baisse de poids de graines montre que les deux types du déficit hydrique ont été appliqués aux stades les plus sensibles (début floraison et remplissage des gousses), engendrant ainsi l'avortement ou la chute des fleurs et des jeunes gousses, ce qui aurait conduit à l'obtention de faible nombre de gousses atteignant la maturité. En effet, le nombre de gousses récoltées a connu des baisses de 35% (DH1) et 40% (DH2) par rapport à celui enregistré en conditions d'irrigation non limitante. Selon [22], cette réduction du nombre de gousses récoltées sous déficit hydrique serait liée à l'abscission des organes de reproduction (fleurs et gousses). En plus de la réduction de nombre de gousses par plant qu'ils occasionnent, DH1 et DH2 affectent négativement le poids de 100 graines en le réduisant respectivement de 25% et 22%. Ces résultats sont en accord avec ceux de certains auteurs ([41], [42]). Des travaux ayant porté sur le niébé ont également montré que le déficit hydrique affecte négativement ces variables agronomiques ([43], [44], [17]). Dans cette étude, il a été enregistré des chutes de la valeur de l'indice de récolte en conditions DH1 et DH2, indiquant une faible translocation des photosynthétats vers les gousses, d'où l'obtention des graines de petite taille en conditions de stress. La perte de poids des graines engendrée par le déficit hydrique a varié d'un génotype à l'autre et d'un régime hydrique à un autre. Afin de comparer les génotypes, l'indice de sensibilité à la sécheresse (I_s) des variables a été utilisé dont l'analyse a révélé un effet génotypique et/ou une interaction significative entre génotype et régime hydrique. Cet indice a montré des comportements différents des génotypes selon le stade auquel le déficit hydrique a été appliqué. En conditions de DH1, selon l' I_s décroissant, les génotypes se classent selon leurs performances comme suit: IT98K-1111-1, IT96D-610, Dan-Ila, K VX-61-1, Gourgou puis Tiligré; tandis qu'en conditions DH2, ils se classent ainsi: IT98K-1111-1, IT96D-610, Gourgou, Dan-Ila, K VX-61-1 et Tiligré. Le plus grand I_s observé chez Tiligré sous DH1 peut s'expliquer par son important développement végétatif, à une importante réduction de la transpiration

et de la teneur en chlorophylle lesquels ont conduit non seulement à une importante diminution du nombre de gousses par plant due à l'avortement des organes reproducteurs mais aussi à un faible poids de 100 graines en conditions de stress hydrique du fait de la translocation des assimilats vers les organes végétatifs au détriment des organes de reproduction (gousses et graines). En ce qui concerne Gourgou sous DH1, sa sensibilité peut être associée à la réduction de la transpiration qui a réduit le nombre de gousses matures du fait d'important avortement des fleurs et des jeunes gousses. Les résultats obtenus montrent que la baisse de poids de graines par plant enregistrée chez Tiligré, Gourgou et Dan-Ila peut être attribuée à la réduction de la teneur en chlorophylle de feuilles. En effet, ces génotypes ont subi des pertes de la teneur en chlorophylle de respectivement 34%, 19% et 13%. Des auteurs [26] ont observés des pertes de rendement en graines de plus de 95% chez les génotypes ayant subi une diminution de la teneur en chlorophylle de plus de 15%. Les résultats indiquent que les génotypes les plus tolérants à ces deux types de contraintes hydriques sont respectivement IT98K-1111-1 et IT96D-610. La meilleure tolérance de IT98K-1111-1 peut être liée à sa précocité et à sa meilleure utilisation de l'eau dans les deux conditions stressantes. Ce génotype a aussi le meilleur indice de récolte, ce qui pourrait signifier qu'il a une bonne capacité de transloquer les assimilats vers les organes de reproduction en dépit du déficit hydrique. IT96D-610 qui est un témoin vulgarisé a, par contre, montré de comportement différent sous les deux types de stress hydrique. En conditions DH1, il a adopté une stratégie le permettant de continuer ses activités physiologiques en présentant une bonne transpiration et une teneur en chlorophylle élevée. A la levée de stress, ce génotype a vite bouclé son cycle avant qu'une autre série de stress ne soit appliquée. Dans les conditions DH2, il a ralenti sa croissance et a favorisé le développement des organes de reproduction au détriment des organes végétatifs.

Dans cette étude, l'investigation de la relation entre les paramètres étudiés a montré que la transpiration n'est pas du tout associée aux composantes de rendement dans les conditions du déficit hydrique, alors qu'une forte absorption d'eau pendant le stade remplissage des gousses est essentielle pour obtenir un important rendement. Les principales composantes de rendement (nombre de gousses, poids des gousses et graines) sont significativement et positivement corrélées à la TE et à l'IR dans tous les trois traitements hydriques mais ces associations sont plus fortes en conditions du déficit hydrique (DH1 et DH2). Des résultats similaires ont été trouvés par [27]. Cela montre la pertinence de ces paramètres comme critères qu'on peut utiliser dans l'identification des meilleurs génotypes de niébé en conditions du déficit hydrique. Selon [32], une forte valeur de la TE peut être liée à un rendement en graines plus élevé. Dans ce travail, les résultats obtenus ont montré que les génotypes tolérants au déficit hydrique ont des valeurs plus élevées de la TE et de l'IR par rapport aux génotypes sensibles tandis que ces derniers ont tendance à transpirer plus que les génotypes tolérants. Ces résultats corroborent ceux de [34] qui a trouvé des valeurs plus importantes de TE chez les génotypes tolérants par rapport aux génotypes sensibles avec cependant une utilisation en eau similaire. Au champ, les résultats obtenus ont montré une importante variation génotypique pour le paramètre rendement des graines indiquant que les génotypes étudiés n'ont pas le même potentiel de production de graines. Parmi les 25 génotypes étudiés, **Gourgou, Tiligré, K VX-61-1 et Dan-Ila, K VX-414-22-2 et Yacine** ont les meilleurs rendements (fanés et graines) et confirment leur performances observées en conditions de lysimètre. Les hauts rendement en gousses et en fanés observés chez ces génotypes revèlent un caractère de double usage pour les graines (consommation humaine) et les fanés (consommation animale). K VX-525, IT96D-610 et IT98K-1111-1 ont montré des faibles productions de fourrages mais se sont classés parmi les meilleurs génotypes en termes de la production des gousses et des graines. Les génotypes IT96D-610 et IT98K-1111-1 peuvent être particulièrement recommandés aux zones à faibles pluviométries pour accroître la production des gousses. Outre les résultats obtenus au lysimètre, d'autres travaux ont montré que ces génotypes sont non seulement tolérants à la sécheresse, mais sont aussi précoces ([20], [29]).

V. Conclusion

Bien que le niébé soit considéré comme une culture tolérante à la sécheresse, les résultats de cette étude montrent que sa culture nécessite une humidité suffisante pour une croissance et un rendement potentiels. Les résultats révèlent que le déficit hydrique affecte négativement les variables physiologiques telles que la transpiration, la température de la canopée et la teneur en chlorophylle de feuilles et agronomiques telles que le nombre de gousses et de graines par plant, le poids de 100 graines et le poids de graines par plant. L'étude a montré des grandes différences des effets de DH1 et DH2 sur les paramètres physiologiques. Ainsi, DH1 a plus affecté la température de la canopée et la teneur en chlorophylle des feuilles alors que DH2 a conduit à un raccourcissement du cycle par rapport à DH1. Pour les paramètres agronomiques, nos résultats n'ont pas montré des effets significativement différents entre DH1 et DH2. Les génotypes IT98K-1111-1, IT96D-610 et K VX-61-1 se sont révélés comme génotypes de choix en termes de la production de gousses par plants et de la tolérance à la sécheresse. Il ressort de nos résultats que le nombre de gousses par plant, la transpiration efficace, l'indice de récolte et la précocité sont des critères pertinents dans l'identification des génotypes à haut rendement en graines et tolérants à la sécheresse chez le niébé. De ce fait, le génotype idéal pour accroître la production du

niébe est celui qui aurait réuni ces critères d'autant plus que les performances observées au lysimètre en conditions d'irrigation non limitante ont été confirmées au champ.

Remerciements

Ce travail de thèse financé par le Programme Productivité Agricole en Afrique de l'Ouest (PPAAO), a également bénéficié du soutien financier de Ministère Fédéral de la Formation et de la Recherche (BMBF, Allemagne) et le Centre Ouest Africain de Service Scientifique sur le Changement Climatique et l'Utilisation Adaptée des Terres (WASCAL).

Références bibliographiques

- [1]. **S. Padulosi and N. Ng.** Origin, taxonomy, and morphology of *Vigna unguiculata* (L.) Walp. *Advances in cowpea research*. 1997; 1-12.
- [2]. **C.O. Gwathmey and A.E. Hall.** Adaptation to midseason drought of cowpea genotypes with contrasting senescence traits. *Crop Science*. 32(3), 1992; 773-778.
- [3]. **B. Singh, Y. Mai-Kodomi and T. Terao.** Relative drought tolerance of major rainfed crops of the semi-arid tropics. *Indian Journal of Genetics & Plant Breeding*. 59(4), 1999; 437-444.
- [4]. **B. Singh and T. Matsui.** Cowpea varieties for drought tolerance. *Challenges and Opportunities for Enhancing Sustainable Cowpea Production*. 2002; 287-300.
- [5]. **Hall, A. E. (2004).** Breeding for adaptation to drought and heat in cowpea. *European Journal of Agronomy* 21, 447-454.
- [6]. **R. M Chiulele.** Breeding cowpea (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) for improved drought tolerance in Mozambique, University of KwaZulu-Natal, Pietermaritzburg. 2010.
- [7]. **F. Hamidou, A. Harou, B. Achirou, O. Halilou and Y. Bakasso.** Fixation de l'azote chez l'arachide et le niébé en conditions de sécheresse pour l'amélioration de la productivité au Sahel. *Tropicicultura*. 2018; 36(1), 63-79.
- [8]. **O. Coulibaly and J. Lowenberg-DeBoer.** The economics of cowpea in West Africa. In "Proceedings, Third World Cowpea Conference, Challenges and Opportunities for Enhancing Sustainable Cowpea Production. IITA". 2002; 351-366.
- [9]. **A. Langyintuo, J. Lowenberg-DeBoer, M. Faye, D. Lambert, Ibro G, Moussa B, Kergna A, Kushwaha S, Musa S and Ntouka, G.** Cowpea supply and demand in West and Central Africa. *Field Crops Research*. 2003; 82(2-3), 215-231.
- [10]. **E. S. Monyo and CL. Gowd.** "Grain Legumes Strategies and Seed Roadmaps for Select Countries in Sub-Saharan Africa and South Asia," International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics. 2014
- [11]. **S. A. Tarawali, B. Singh, Gupta S, Tabo R, Harris F, Nokoe S, Fernández-Rivera S, Bationo A, Manyong V and Makinde K.** Cowpea as a key factor for a new approach to integrated crop–livestock systems research in the dry savannas of West Africa. *Challenges and Opportunities for Enhancing Sustainable Cowpea Production*. 2002; 233-251.
- [12]. **T. Abate, A. D. Alene, D. Bergvinson, Shiferaw B, Silim S, Orr A and Asfaw S.** Tropical grain legumes in Africa and south Asia: knowledge and opportunities. International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics. 2012
- [13]. **W. Muchero, JD. Ehlers and P. A. Roberts.** Seedling stage drought-induced phenotypes and drought-responsive genes in diverse cowpea genotypes. *Crop Science*. 2008; 48(2), 541-552.
- [14]. **E. Agbicodo, Fatokun C, Muranaka S. and Visser R.** Breeding drought tolerant cowpea: constraints, accomplishments, and future prospects. *Euphytica*. 2009; 167(3), 353-370.
- [15]. **Banque-Mondiale.** Evaluation des risques du secteur agricole au Niger: de la réaction aux crises à la gestion des risques à long terme. *Rapport d'étude*. 2013.
- [16]. **F. Hamidou, M. H Dicko, Zombre G., Traoré, A. S., and Guinko, S. (2005).** Réponse adaptative de deux variétés de niébé à un stress hydrique. *Cahiers Agricultures* 14(1), 561-567.
- [17]. **J.P. Amigues, P. Debaeke, Itier B, Lemaire G, Seguin B, Tardieu F and Thomas A.** Sécheresse et agriculture. Réduire la vulnérabilité de l'agriculture à un risque accru de manque d'eau. *Expertise scientifique collective, synthèse du rapport, INRA*. 2006.
- [18]. **A. R. Sanda and IM Maina.** Effect of drought on the yields of different cowpea cultivars and their response to time of planting in Kano State, Nigeria. *International Journal of Environment & Bioenergy*. 2013; 6, 171-176.
- [19]. **N. Belko, N. Cisse, NN. Diop, Zombre G, Thiaw S, Muranaka S and Ehlers J.** Selection for postflowering drought resistance in short-and medium-duration cowpeas using stress tolerance indices. *Crop Science*. 2014; 54(1), 25-33.
- [20]. **J. Ndiso, G. Chemining'wa, Olubayo F and Saha H.** Effect of drought stress on canopy temperature, growth and yield performance of cowpea varieties. *International J Plant Soil Sci*. 2016; 9(3), 1-12.
- [21]. **S. Nigam, S. Chandra, Sridevi, K. R., Bhukta, M., Reddy, A., Rachaputi, N. R., Wright, G., Reddy, P., Deshmukh, M. and Mathur, R.** Efficiency of physiological trait-based and empirical selection approaches for drought tolerance in groundnut. *Annals of Applied Biology*. 2005; 146(4), 433-439.
- [22]. **F.E. Ahmed, A. H Suliman.** Effect of water stress applied at different stages of growth on seed yield and water-use efficiency of cowpea. *Agriculture and Biology Journal of North America*. 2010; 1(4), 534-540.
- [23]. **N. Belko, M. Zaman-Allah, Cisse N, Diop NN, Zombre G, Ehlers JD and Vadez V.** Lower soil moisture threshold for transpiration decline under water deficit correlates with lower canopy conductance and higher transpiration efficiency in drought-tolerant cowpea. *Functional Plant Biology*. 2012; 39(4), 306-322.
- [24]. **M. Halime, N. Belko, N. Cisse, B. Sine and I.Ndoye.** Amélioration de l'adaptation à la sécheresse chez le niébé (*Vigna unguiculata* L. Walpers). *Journal of Applied Biosciences*. 2014; 77(1), 6550-6563.
- [25]. **W.J.A. Lalsaga, R. Nana, M. Sawadogo, Sawadogo N, Kiebre M and Drabo I.** Evaluation de dix (10) genotypes de niébé [*Vigna unguiculata* (L.) Walp.] par rapport à leur tolérance au stress hydrique. *International Journal of Innovation and Applied Studies*. 2016; 14(4), 1005-1014.
- [26]. **O. Halilou, F. Hamidou, B.K. Taya, Mahamane S and Vadez V.** Water use, transpiration efficiency and yield in cowpea (*Vigna unguiculata*) and peanut (*Arachis hypogaea*) across water regimes. *Crop and Pasture Science*. 2015; 66(7), 715-728.
- [27]. **A. K. D.Toudou, S. Atta, M. M. Inoussa, F. Hamidou and Y. Bakasso.** Effect of water deficit at different stages of development on the yield components of cowpea (*Vigna unguiculata* L. Walp) genotypes. *African Journal of Biotechnology*, 2017; Vol. 17(9), pp. 279-287
- [28]. **A. Harou, F. Hamidou and Y. Bakasso.** Performances morpho-physiologiques et agronomiques du niébé [*Vigna unguiculata* (L.) Walpers] en conditions du déficit hydrique J. Appl. BioSci, 2018; 128: 12874 -12882.

- [29]. **V. Vadez, S. Rao, J. Kholova, L. Krishnamurthy, Kashiwagi J, Ratnakumar P, Sharma K, Bhatnagar-Mathur P and Basu P.** Root research for drought tolerance in legumes: quo vadis. *Journal of Food legumes*. 2008; 21(2), 77-85.
- [30]. **M. Zaman-Allah, D.M. Jenkinson and V. Vadez.** A conservative pattern of water use, rather than deep or profuse rooting, is critical for the terminal drought tolerance of chickpea. *Journal of Experimental Botany*. 2011 ; 62(12), 4239-4252.
- [31]. **V. Vadez, S.P. Deshpande, Kholova J, Hammer GL, Borrell AK, Talwar HS and Hash CT.** Stay-green quantitative trait loci's effects on water extraction, transpiration efficiency and seed yield depend on recipient parent background. *Functional Plant Biology*. 2011a; 38(7), 553-566.
- [32]. **V. Vadez, L. Krishnamurthy, Hash C, Upadhyaya H and Borrell A.** Yield, transpiration efficiency, and water-use variations and their interrelationships in the sorghum reference collection. *Crop and Pasture Science*. 2011b; 62(8), 645-655.
- [33]. **F. Beggi, H. Falalou, Buerkert A and Vadez V.** Tolerant pearl millet (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.) varieties to low soil P have higher transpiration efficiency and lower flowering delay than sensitive ones. *Plant and Soil*. 2015; 389(1-2), 89-108.
- [34]. **P. Ratnakumar and Vadez V.** Groundnut (*Arachis hypogaea*) genotypes tolerant to intermittent drought maintain a high harvest index and have small leaf canopy under stress. *Functional Plant Biology*. 2011; 38(12), 1016-1023.
- [35]. **Ratnakumar P, V. Vadez, S. Nigam and Krishnamurthy L.** Assessment of transpiration efficiency in peanut (*Arachis hypogaea* L.) under drought using a lysimetric system. *Plant Biology*. 2009; 11, 124-130.
- [36]. **L.B.Y. Abdou Razakou, S .Addam Kiari, Mensah B and Akromah R.** Water stress and water use efficiency in cowpea [*Vigna unguiculata* (L.) Walp.] under controlled environment. *International Journal of Agricultural Science Research*. 2013 ;2(5), 191-199
- [37]. **T. Abidoye.** Effects of soil moisture content on growth and yield of cowpea (*Vigna unguiculata* (L.) Walp). B. Agric, Dissertation, University of Ilorin, Nigeria. 2004.
- [38]. **J. Okon.** Effect of water stress on some growth aspects of two varieties of cowpea, *Vigna unguiculata* (L.) Walp Fabaceae. *Bull. Env. Pharmacol. Life Sci*. 2013; 2(5), 69-74.
- [39]. **F. Hamidou.** Paramètres physiologiques, biochimiques et agronomiques pertinents pour l'amélioration de l'adaptation du niébé (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) au déficit hydrique (Doctoral dissertation). *Université de Ouagadougou*.
- [40]. **H. Baigorri, M Antolin and M. Sánchez-Díaz.** Reproductive response of two morphologically different pea cultivars to drought. *European Journal of Agronomy*. 1999 ; 10(2), 119-128.
- [41]. **M.J.D. Sousa-Majer, N.C. Turner, Hardie DC, Morton RL, Lamont B and Higgins TJ.** Response to water deficit and high temperature of transgenic peas (*Pisum sativum* L.) containing a seed-specific α -amylase inhibitor and the subsequent effects on pea weevil (*Bruchus pisorum* L.) survival. *Journal of Experimental Botany*. 2004; 55(396), 497-505.
- [42]. **B. Sarr, O. Diouf, M. Diouf, Roy-Macauley H and Brou C.** Utilisation de paramètres agronomiques comme critères de résistance à la sécheresse chez trois variétés de niébé cultivées au Sénégal et au Niger. *Sécheresse*. 2001; 12(4), 259-266.
- [43]. **A.E. Hall, N. Cisse, S. Thiaw, H.O. Elawad, J.D. Ehlers, A.M. Ismail, R.L Fery, P.A Roberts, LW Kitch, and LL.Murdock.** Development of cowpea cultivars and germplasm by the Bean/Cowpea CRSP. *Field Crops Research*. 2003 ; 82(2-3), 103-134.
- [44]. **R.B. Dadson, F. Hashem, I. Javaid, J. Joshi, A. Allen and T. Devine.** Effect of water stress on the yield of cowpea (*Vigna unguiculata* L. Walp.) genotypes in the Delmarva region of the United States. *Journal of agronomy and crop science*. 2005; 191(3), 210-217.

Hamidou Falalou. "Réponse Physiologique Des Génotypes De Niébé [*Vigna Unguiculata* (L.) Walp.] Au Déficit Hydrique En Conditions De Lysimetre Et Performance Agronomique Au Champ". *IOSR Journal of Agriculture and Veterinary Science (IOSR-JAVS)* 12.7 (2019): PP- 22-33