



# Performances agronomiques et stabilité phénotypique de génotypes de Sorgho (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) au Sénégal : une étude des interactions génotypes-environnement

Malick NDIAYE<sup>1,2\*</sup>, Myriam ADAM<sup>3,6,7</sup>, Bertrand MULLER<sup>2,3,4</sup>, Aliou GUISSSE<sup>5</sup>, Ndiaga CISSE<sup>2</sup>

<sup>1</sup>. Institut Sénégalais de Recherches Agricoles (ISRA), CRA de Saint-Louis, Route de Leybar B.P. 240 Saint-Louis, Sénégal

<sup>2</sup>. ISRA/Centre d'Étude Régional pour l'Amélioration de l'Adaptation à la Sécheresse (CERAAS), B.P. 3320 Thiès-Escale, Sénégal

<sup>3</sup>. UMR-AGAP, Univ Montpellier, CIRAD, INRA, Montpellier SupAgro, B.P. 34398 Montpellier, France

<sup>4</sup>. CIRAD, UMR AGAP, 101 Antananarivo, Madagascar

<sup>5</sup>. Université Cheikh Anta Diop de Dakar, Avenue Cheikh Anta Diop, BP 5005 Dakar, Sénégal

<sup>6</sup>. International Crops Research Institute for the Semi-arid Tropics (ICRISAT), BP320, Bamako, Mali

<sup>7</sup>. Institut National de l'Environnement et de Recherches Agricoles (INERA), Bobo- Dioulasso, Burkina Faso.

Auteur correspondant : (\*) [agromalick@yahoo.fr](mailto:agromalick@yahoo.fr)

Original submitted in on 15<sup>th</sup> February 2018. Published online at [www.m.elewa.org](http://www.m.elewa.org) on 31<sup>st</sup> May 2018  
<https://dx.doi.org/10.4314/jab.v125i1.10>

## RESUME

**Objectif :** L'introduction de nouveaux génotypes de sorghos adaptés à divers environnements est confrontée à la présence d'interaction génotype x environnements significative qui en réduit l'efficacité. La présente étude, conduite sur six environnements - combinaisons site-date de semis-année -, analyse l'interaction génotype-environnement et l'adaptabilité et stabilité du rendement grain et biomasse paille de 10 génotypes de sorgho (*Sorghum bicolor* (L.) Moench).

**Méthodologie et résultats :** L'essai a été conduit selon un dispositif en Blocs Complets Randomisés avec quatre répétitions. L'Anova combinée pour les rendements grains et biomasse paille a révélé une valeur hautement significative ( $P < 0,01$ ) pour les génotypes, les environnements et leurs interactions. L'interaction significative a montré que les génotypes réagissent différemment dans les différents environnements. Les rendements moyens des génotypes ont varié de 1854 Kg.ha<sup>-1</sup> (Nieleni) à 547 Kg.ha<sup>-1</sup> (SK5912) pour le grain ; et de 12103 Kg.ha<sup>-1</sup> (IS15401) à 4647 Kg.ha<sup>-1</sup> (CSM63E) pour la biomasse paille. Pour les environnements, les rendements ont varié de 1714 Kg.ha<sup>-1</sup> (S13D1) à 530 Kg.ha<sup>-1</sup> (B13D2) pour le grain ; et de 9642 Kg.ha<sup>-1</sup> (B13D2) à 5742 Kg.ha<sup>-1</sup> (S13D2) pour la biomasse paille. L'analyse AMMI a montré que de bons rendements grains été associés avec des environnements à bonnes fertilité de sol et une bonne pluviométrie, alors que les rendements biomasse paille été plus influencés par la date de semis et la pluviométrie. De même, nous avons pu confirmer pour nos 10 génotypes de sorghos que la stabilité des rendements est en général associée avec de faibles performances, à l'exception du génotype Nieleni qui a de bonnes performances en grain et biomasse paille indépendamment de l'environnement.

*Conclusion et applications des résultats* : Les environnements ont provoqués des réponses différentes des génotypes et la plupart de ces génotypes ont montré une spécificité environnementale. Cette étude trouve son application en sélection variétale et en agronomie. Elle pourrait non seulement aider les programmes de sélection dans le choix des stratégies de sélection pour l'amélioration des rendements en exploitant positivement l'interaction sur les sites à haut potentiel de rendement (S13D1 et S13D2) et l'adaptation générale aux sites au potentiel relativement plus faible (B13D1 et B13D2) mais aussi d'élargir la zone de culture du sorgho au Sénégal qui se fait sur sol argileux. En effet, les dix génotypes étudiés offrent aux producteurs une large gamme de choix variétal en fonction des conditions de cultures (sol et gestion) surtout Nieleni pour assurer leur production en grain et paille dans nos systèmes de production mixtes agriculture-élevage, où la double production est une option privilégiée.

**Mots clés** : Sorgho, Rendement, interaction génotype-environnement, stabilité, AMMI.

### **Agronomic performance and phenotypic stability of Sorghum genotypes (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) in Senegal : a study of genotype-environment interactions**

#### **ABSTRACT**

*Objective* : The introduction of new genotypes of sorghums adapted to different environments is confronted with the presence of significant genotype x environments interaction which reduces their effectiveness. The present study, conducted in six environments - site-date of sowing-year combinations -, analyzes the genotype-environment interaction and the adaptability and stability of grain and straw biomass yields of 10 sorghum genotypes (*Sorghum bicolor* (L.) Moench).

*Methodology and Results* : The experiment was laid down in a Randomized Complete Block Design with four replications. The combined ANOVA for grain and biomass straw yields revealed highly significant ( $P < 0.01$ ) for genotypes, environments and their interactions. The significant interaction showed the genotypes respond differently across the different environments. The mean yields values of genotypes ranged from 1854 Kg.ha<sup>-1</sup> (Nieleni) to 547 Kg.ha<sup>-1</sup> (SK5912) for grain ; and from 12103 Kg.ha<sup>-1</sup> (IS15401) to 4647 Kg.ha<sup>-1</sup> (CSM63E) for straw biomass. For environments, yields ranged from 1714 Kg.ha<sup>-1</sup> (S13D1) to 530 Kg.ha<sup>-1</sup> (B13D2) for grain ; and from 9642 Kg.ha<sup>-1</sup> (B13D2) to 5742 Kg.ha<sup>-1</sup> (S13D2) for straw biomass. The AMMI analysis showed that good grain yields were associated with good soil fertility environments and good rainfall, while biomass straw yields were more influenced by sowing date and rainfall. Similarly, we were able to confirm for our 10 sorghum genotypes that yield stability is generally associated with poor performance, with the exception of the Nieleni genotype which has good grain and biomass straw performance regardless of the environment.

*Conclusion and application* : This study application is in the varietal selection and in agronomy. It could not only assist breeding programs in choosing breeding strategies for yield improvement by positively exploiting the interaction at sites with high yield potential (S13D1 and S13D2) and general adaptation to sites with relatively lower potential (B13D1 and B13D2) but also to expand the area of cultivation of sorghum in Senegal which is done on clay soil. Indeed, the ten genotypes studied offer farmers a wide range of varietal choices depending on the growing conditions (soil and management) especially Nieleni to ensure their production in grain and straw in our mixed farming-livestock production systems, where the double production is a preferred option.

**Keywords**: Sorghum, yield, genotype-environment interaction, stability, AMMI.

#### **INTRODUCTION**

Le sorgho (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) est une des principales céréales cultivée dans les régions tropicales arides et semi-arides (Djè et al., 2007). Considéré comme une plante de région chaude, le sorgho, de par sa plasticité, est susceptible de

croître aussi bien dans les régions tempérées que tropicales. Avec une production mondiale d'environ 68,9 millions de tonnes en 2015, sur environ 49,9 millions d'hectares, le sorgho est classé en cinquième position de la production céréalière après

le maïs, le blé, le riz, et l'orge (FAOSTAT, 2015) et est principalement utilisé pour l'alimentation animale dans la plupart des pays développés. Mais en Afrique et en Inde, il constitue un aliment de base pour des millions de personnes (Agrama et Tuinstra, 2003). Par ailleurs, la culture du sorgho est l'une des plus importantes pouvant être utilisées pour la production de bioéthanol (Reddy *et al.*, 2008). Au Sénégal, le sorgho est, après le mil, la deuxième céréale pluviale cultivée avec une superficie totale estimée à plus de 200 737 ha pour une production nationale de 188 500 tonnes et un rendement moyen de 939 Kg/ha (FAOSTAT, 2015). Il constitue une des bases de l'agriculture vivrière de la population (Ba *et al.*, 2010). Cependant sa production est confrontée à plusieurs contraintes qui entraînent des baisses de rendement (ou « des faibles rendements »), à savoir les irrégularités de la distribution des pluies, accentuées par le changement climatique, la faible fertilité des sols et leur caractère sableux, et diverses maladies et ravageurs des récoltes (Seguin et Soussana, 2008). Au Sénégal, parmi les actions en faveur de la sécurité alimentaire figurent la création et/ou l'introduction de nouveaux génotypes de sorghos adaptés à divers environnements en termes de sol et de climat. Cependant, lorsque des génotypes sont évalués en vue de faire des recommandations, un problème commun se pose : à savoir celui de la variation parfois élevée de leur productivité d'une année à l'autre et d'un environnement à l'autre. Cette variabilité crée une difficulté à déterminer quels génotypes peuvent être recommandés, et cette question mérite d'être examinée avec attention. La réponse différente d'un génotype dans différents environnements est connue sous le nom d'interaction génotype-environnement (G x E). Les possibles complications pouvant résulter d'éventuelles interactions G x E peuvent être limitées par l'identification de génotypes aux performances stables car adaptés à des conditions de culture assez diversifiées (Cruz et Regazzi,

1997). Plusieurs méthodes statistiques ont été développées pour caractériser l'effet de l'interaction G x E des génotypes sélectionnés et pour prédire les réponses phénotypiques aux changements environnementaux. Cependant, la plupart des méthodes de stabilité statistique ne sont pas en mesure de fournir un modèle de réponse varié précis et complet pour cette interaction (Holts, 1995), ce qui fait surtout que la réponse génotypique à la variation environnementale est multi-variée et que plusieurs indices de stabilité ont une réponse uni-variée (Crossa, 1990). De nombreuses méthodes ont été développées pour exposer les modèles d'interaction G x E. Parmi ceux-ci, le modèle des effets additifs et l'interaction multiplicative (AMMI) est une méthode multi-variée robuste pour les essais multi-environnementaux (Romagosa et Fox, 1993). La méthode d'analyse des effets additifs et de l'interaction multiplicative (AMMI) intègre l'analyse de variance (ANOVA) et l'analyse en composantes principales (PCA) dans une approche unifiée qui peut être utilisée pour analyser des essais multi-environnements (Zobel *et al.*, 1988 ; Crossa *et al.*, 1990, Gauch et Zobel, 1996) : l'ANOVA va étudier les principaux effets des génotypes et des environnements et la PCA porte sur la partie non additive du modèle (G x E). L'AMMI fournit la somme des carrés des écarts d'interaction (G x E) avec un nombre minimal de degrés de liberté. De plus, l'AMMI quantifie simultanément la contribution de chaque génotype et environnement à la somme des carrés des écarts de l'interaction (G x E), et fournit une interprétation graphique simple des résultats par la technique du graphe biplot pour classer simultanément les génotypes et les environnements (Kempton, 1984, Zobel *et al.*, 1988). Notre étude présentée ici vise à analyser l'interaction génotype-environnement et l'adaptabilité et stabilité phénotypique de dix génotypes de sorghos au Sénégal, en utilisant la méthode AMMI.

## **MATERIEL ET METHODES**

**Site expérimentaux :** Les expérimentations ont été menées lors des saisons des pluies 2013, 2014 dans deux stations de recherche de l'Institut Sénégalais de Recherches Agricoles (ISRA), à savoir les stations de

Sinthiou Malem (en 2013, 2014) et de Bambey (en 2013). Les caractéristiques des différents sites expérimentaux sont données dans le tableau 1 et la figure 1 présente les évolutions des pluviométries et des températures durant

les essais. La station de Bambey est soumise à un climat typiquement sahélien marqué par une longue saison sèche de 8 à 9 mois et une saison des pluies de 3 à 4 mois. Les sols dominants sont des sols sableux ayant une très faible capacité de rétention en eau de 90 à 100 mm.m<sup>-1</sup> (Vachaud *et al.*, 1978 ; Imbernon, 1981). La station Sinthiou Malem se situe à l'interface entre les zones sahéliennes et soudaniennes. Elle bénéficie d'une saison des pluies de 4 à 5 mois plus abondante qu'à Bambey, mais marquée par une variabilité interannuelle forte. Ses sols sont aussi à dominance sableuse mais présentent des taux d'argile et de limons légèrement plus élevés, inférant des capacités de rétention plus élevés.

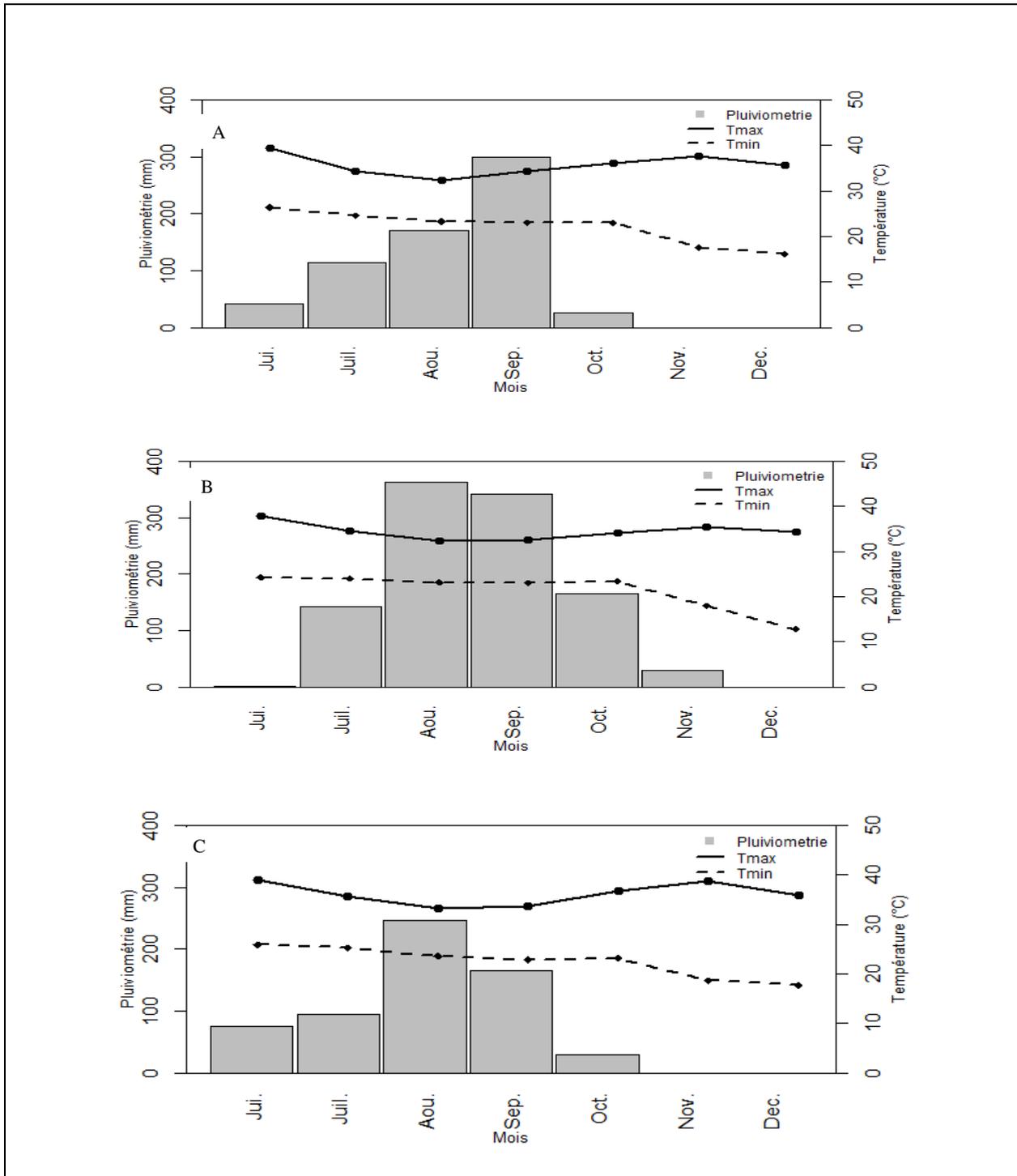
**Matériel végétal :** Le matériel végétal est constitué de dix génotypes issus de régions diverses d'Afrique de l'Ouest et Centrale qui sont reconnus pour être chacun performant dans sa zone de diffusion. Ils ont été retenus pour constituer un échantillon contrasté en ce qui concerne leurs durées de cycle (chacune étant adaptée à sa région cible), architectures (hauteur, diamètre de tige notamment), caractéristiques structurales (lignine, cellulose), et productions de grains et de biomasse. Les caractéristiques de ces dix génotypes sont présentées au tableau 2.

**Conduite des essais :** Pour chacun des sites, le travail de sol a consisté en un labour croisé aux disques (profondeur environ 25 cm) suivi d'un hersage. Les semences ont été traitées au fongicide-insecticide Granox (association de captafol-bénomyl et de carbofuran). Les semis ont toujours été effectués après une bonne pluie (dates de semis au tableau 1). Les cultures ont été semées en poquets de 5-6 graines avec des écartements de 0,80 m entre ligne et 0,20 m sur la ligne, soit à une densité de 62500 poquets.ha<sup>-1</sup>. Le démariage s'est effectué à un plant, en condition humide, avant le tallage (environ 15<sup>ème</sup> jour). Une fertilisation minérale a été appliquée selon les recommandations de la recherche agronomique au Sénégal : épandage d'engrais N-P-K (15% N, 15% P, 15% K) à la dose de 150 Kg.ha<sup>-1</sup> au semis ou à la levée, et deux apports d'urée (46% N) à la dose de 50 Kg.ha<sup>-1</sup>, juste après le démariage pour le premier puis à la montaison pour le second. Des sarclages, des traitements phytosanitaires (Décis et Diméthoate) et une protection par gardiennage contre les oiseaux ont été assurés selon les besoins afin de minimiser les incidences des ennemis des cultures. Des diguettes antiérosives ont été aménagées tout autour des essais pour limiter les ruissellements.

**Tableau 1 :** Caractéristiques des différents sites d'essais.

Environnement	Zone	Code	Position	Altitude (m)	Type sol*	Pluie (mm)	Tmin (°C)	Tmax (°C)	Date semis	Précédant cultural
Semis 1 en 2013	Bambey	B13D1	14°42'N/ 16°29'W	20	Sableux (A=2,3%, L=3,5%, S=94,2%)	644	23	33,9	17/07/ 2013	Jachère
Semis 2 en 2013	Bambey	B13D2			Sableux (A=2,3%, L=3,5%, S=94,2%)	566	22,8	33,9	31/07/ 2013	Jachère
Semis 1 en 2013	Sinthiou Malem	S13D1	13°49' N/13°55' W	23	Sablo-limoneux (A=8,0%, L=4,0%, S=88,0%)	575	21,4	35,3	25/07/ 2013	Jachère
Semis 2 en 2013	Sinthiou Malem	S13D2			Sablo-limoneux (A=8,0%, L=4,0%, S=88,0%)	536	21,2	35,4	06/08/ 2013	Jachère
Semis 1 en 2014	Sinthiou Malem	S14D1			Sableux (A=5,1%, L=5,1%, S=89,8%)	448	22,2	35,7	17/07/ 2014	Arachide
Semis 2 en 2014	Sinthiou Malem	S14D2			Sableux (A=5,5%, L=4,2%, S=90,3%)	377	22,1	35,6	06/08/ 2014	Arachide

A= Argile, L= Limon, S=Sable, \* Classification selon la méthode USDA faite sur les données moyennes sur l'horizon 0- 30 cm



**Figure 1:** Pluviométrie et températures minimale et maximale des zones d'étude Bambeï 2013 (A) et Sinthiou Malem 2013 (B), 2014 (C). Jui.=Juin, Juil= Juillet, Aou= Août, Sep.=Septembre, Oct. =Octobre, Nov. = Novembre, Dec. = Décembre

Table 2 : caractéristiques des dix génotypes étudiés.

Génotype	Code	Type	Sensibilité photopériode	Longueur cycle	Isohyètes	Finalité	Hauteur plant	Rendement potentiel	Forme panicule	Autres	Origine
Fadda	G1	<i>Guinea (Hybride)</i>	Moyenne	128 jours	700-1000 mm	Grain-biomasse	2-3 m	4,5t/ha	semi-lâche	tolérant : moisissure, anthracnose	Mali, Sélection IER/ICRISAT, pedigree 02-SB-F5DT-12A X Lata.
Nieleni	G2	<i>Guinea (Hybride)</i>	Faible	115jours	700-800 mm	Grain	3 m	4t/ha	Semi-compacte	tolérant : moisissure, anthracnose	Mali, Sélection IER/ICRISAT
IS15401	G3	<i>Guinea-Caudatum</i>	Forte	115 jours	900-1200 mm	Biomasse	4-4,5 m	2t/ha	semi-compacte	Résistant : moisissure, striga et cécidomyie	Cameroun, sélection IER/ICRISAT
Pablo	G4	<i>Guinea (Hybride)</i>	Moyenne	125 jours	700-1000 mm	Biomasse	4 m	4 t/ha	Lâche	tolérant : moisissure et anthracnose	Mali, Sélection IER/ICRISAT, pedigree FambeA X Lata.
CSM63E	G5	<i>Guinea</i>	Faible	90 jours	600-1000 mm	Grain	4 m	2t/ha	Lâche	tolérant : maladies et insectes	Mali, variété traditionnelle
SK5912	G6	<i>Caudatum</i>	Forte	170 jours	700-900 mm	biomasse	2 m	2,5-3,5 t/ha	semi-compacte	tolérant : moisissure, anthracnose	Nigéria
Grinkan	G7	<i>Caudatum</i>	Non	90 jours	500-800 mm	Grain-biomasse	1,2 m	4t/ha	semi-compacte	résistant : cécidomyie, insectes	Mali, sélection ICRISAT
Soumba	G8	<i>Caudatum</i>	Faible	115 jours	600-1000 mm	Grain-biomasse	2,5 m	2,5t/ha	semis-compacte	tolérant : maladies et, insectes, striga	Mali
621B	G9	<i>Caudatum</i>	Non	105 jours	600-900 mm	Grain	1,75 m	2,5-3t/ha	semi-compacte	résistant aux moisissures	Sénégal, sélection ISRA, pedigree CE 151-262 X Sarvato-1
F2-20	G10	<i>Caudatum</i>	Faible	110 jours	600-900 mm	Grain	2,1m	3- 5,3t/ha	semi-compacte	résistant : moisissure, striga	Sénégal, sélection ISRA, pedigree (MN1056 x 68-20) X 7410-195-1

**Dispositif expérimental et variables mesurées :** Tous les essais ont été conduits selon un même dispositif en blocs complets randomisés avec quatre répétitions (les positions aléatoires des parcelles étant différentes d'un essai à l'autre). Les parcelles élémentaires comprenaient 7 lignes de 40 poquets, pour une superficie de 44,8 m<sup>2</sup> (5,6 m x 8 m), avec en leur centre une placette de 21 poquets (3 lignes x 7 poquets ; 3,36 m<sup>2</sup>) destinée à l'évaluation des rendements. Les biomasses en paille (feuilles et tiges) et les panicules ont été récoltées à la maturité des grains sur ces placettes. Après battage tous les grains ont été récupérés. Après séchage (à l'air en serre puis 48h à l'étuve à 65°C) les poids secs de paille et de grains ont été déterminés pour pouvoir calculer les rendements en grains et en biomasses sèches en kg.ha<sup>-1</sup>.

**Analyses statistiques des données :** Les données de rendements grains et biomasses paille ont d'abord fait l'objet d'une analyse de la variance par environnement – défini dans cette présente étude comme étant une situation expérimentale c'est-à-dire une combinaison « site-année-date de semis » (6 en tout) – pour vérifier l'existence d'une différence entre les génotypes. Ensuite une analyse combinée de la variance a été effectuée, considérant l'effet du génotype comme fixe et celui de chaque environnement comme aléatoire selon le modèle statistique suivant :

$$Y_{ijk} = \mu + G_i + E_j + B_k(E_j) + (GE)_{ij} + \varepsilon_{ijk}$$

Où  $Y_{ijk}$  est le rendement du génotype  $i$  dans l'environnement  $j$  et le bloc  $k$ ,  $\mu$  est la moyenne générale de tous les rendements,  $G_i$  est l'effet du génotype  $i$ ,  $E_j$  est l'effet de l'environnement  $j$ ,  $B_k(E_j)$  est l'effet du bloc  $k$  dans l'environnement  $j$ ,  $GE_{ij}$  est l'interaction du génotype  $i$  avec l'environnement  $j$  et  $\varepsilon_{ijk}$  est l'erreur associée à la moyenne du génotype  $i$  dans l'environnement  $j$  et dans le bloc  $k$ . L'homogénéité des variances résiduelles à travers les environnements a été testée en utilisant le test de Bartlett (Bartlett, 1937). Enfin, l'adaptabilité et les analyses de stabilité phénotypique ont été effectuées par la méthode AMMI comme décrit dans Zobel *et al.* (1988) en utilisant le modèle statistique suivant :

## RESULTATS

**Effets génotype, environnement et génotype x environnement :** L'analyse de la variance combinée est présentée dans le tableau 3. Les effets du génotype, de l'environnement et de l'interaction génotype-environnement ont été significatifs pour les rendements en grains et en biomasses ( $p < 0,001$ ). Le rendement moyen en grains des génotypes (tableau 4) a varié de

$$Y_{ij} = \mu + g_i + e_j + \sum_{k=1}^n (\lambda_k \alpha_{ik} y_{jk} + r_{ij}) + \varepsilon_{ij}$$

Où  $Y_{ij}$  est la réponse moyenne du génotype  $i$  dans l'environnement  $j$ ;  $\mu$  est la moyenne globale;  $g_i$  est l'effet fixé du génotype  $i$  ( $i = 1, 2, \dots, g$ );  $e_j$  est l'effet aléatoire de l'environnement  $j$  ( $j = 1, 2, \dots, e$ );  $\varepsilon_{ij}$  est l'erreur expérimentale; l'interaction  $G \times E$  est représentée par  $\sum_{k=1}^n \lambda_k \alpha_{ik} y_{jk} + r_{ij}$

où  $\sum$  est la somme des  $k = 1, 2, \dots, k$  axes de l'analyse en composantes principales (PCA) intégrant le modèle,  $\lambda_k$  est la valeur propre de l'axe  $k$ ,  $\alpha_{ik}$  est le vecteur propre du génotype  $i$  sur l'axe  $k$ ,  $y_{jk}$  est le vecteur propre de l'environnement  $j$  sur l'axe  $k$ , et  $r_{ij}$  est la résiduelle de l'interaction. La somme des carrés des écarts pour l'interaction  $G \times E$  a été divisée en  $n$  axes singuliers ou composants principaux d'interaction (IPCA), qui a été décrite par la partie standard, chaque axe correspondant à un modèle AMMI. Généralement, lorsque les interactions  $G \times E$  sont significatives, les modèles avec un (AMMI<sub>1</sub>) ou deux (AMMI<sub>2</sub>) axes principaux sont les plus utilisés à cause de leur simplicité qu'on peut représenter en graphe biplot (c'est-à-dire sur un type de graphique qui contient deux catégories de points). Dans notre étude, il s'agit de génotypes et d'environnements. L'interprétation du graphique biplot a été basée sur la variation causée par les effets principaux additifs du génotype et de l'environnement et l'effet multiplicatif de l'interaction  $G \times E$ . Selon Zobel *et al.* (1988) pour le graphe AMMI<sub>2</sub>, les génotypes, qui ont de faibles scores sur l'IPCA<sub>1</sub> (premier axe de l'analyse en composante principale de l'interaction) ou l'IPCA<sub>2</sub> (deuxième axe de l'analyse en composante principale de l'interaction) ou les deux à la fois, contribuent faiblement à l'interaction, et cela indique une adaptation générale. Par contre ceux qui ont des scores élevés, positifs ou négatifs, présentent de fortes interactions, et sont spécifiquement adaptés à l'environnement qui a le score de même signe. Toutes les analyses statistiques ont été effectuées en utilisant le logiciel R version 3.2 (R Développement Core Team, 2015).

1854 Kg.ha<sup>-1</sup> (Nieleni) à 547 Kg.ha<sup>-1</sup> (SK5912). Les génotypes ont montré des performances inconstantes à travers les environnements sauf Fadda et Nieleni qui étaient relativement bons dans tous les environnements (tableau 4). Quatre génotypes ont obtenu un rendement moyen supérieur à la moyenne générale (1320 Kg.ha<sup>-1</sup>) à savoir Nieleni, Fadda, Pablo et 621B avec des

**Ndiaye et al, J. Appl. Biosci. 2018 Performances agronomiques et stabilité phénotypique de génotypes de Sorgho (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) au Sénégal : une étude des interactions génotypes-environnement**

rendements respectifs de 1814 Kg.ha<sup>-1</sup>, 1743 Kg.ha<sup>-1</sup>, 1601 Kg.ha<sup>-1</sup> et 1330 Kg.ha<sup>-1</sup>. Parmi ces génotypes, Nieleni et Fadda ont montré des rendements élevés pour les différents environnements (tableau 4). Les trois génotypes les moins performants ont été Soumba, Grinkan et SK5912 avec des rendements grains moyens respectifs de 1168 Kg.ha<sup>-1</sup>, 1051 Kg.ha<sup>-1</sup> et 547 Kg.ha<sup>-1</sup>. En outre, le rendement moyen en grain des environnements (tableau 4) a varié de 530 Kg.ha<sup>-1</sup> (B13D2) à 1714 Kg.ha<sup>-1</sup> (S13D1). Trois environnements sur les six ont eu des rendements moyens supérieurs à la moyenne générale : S13D1 (1714 Kg.ha<sup>-1</sup>), S14D1 (1696 Kg.ha<sup>-1</sup>), S13D2 (1570 Kg.ha<sup>-1</sup>). En ce qui concerne la biomasse paille (tableau 5), les rendements des génotypes ont varié de 12103 Kg.ha<sup>-1</sup> (IS15401) à 4647 Kg.ha<sup>-1</sup> (CSM63E). Les génotypes ont montré des

performances inconstantes dans tous les environnements sauf IS15401 et SK5912 qui étaient relativement bons dans tous les environnements (tableau 5). Quatre des six génotypes ont obtenu des rendements moyens au-dessus de la moyenne générale (7603 Kg.ha<sup>-1</sup>) à savoir IS15401, SK5912, Fadda et Nieleni, avec des valeurs respectives de 12103 Kg.ha<sup>-1</sup>, 11156 Kg.ha<sup>-1</sup>, 8018 Kg.ha<sup>-1</sup> et de 7935 Kg.ha<sup>-1</sup>. Parmi eux SK5912 et IS15401 ont obtenu des rendements élevés pour plusieurs environnements. Le rendement moyen en biomasse paille des environnements (tableau 5) a varié entre 5742 Kg.ha<sup>-1</sup> (S13D2) et 9536 Kg.ha<sup>-1</sup> (B13D2). Trois environnements sur les six ont des rendements en dessous de la moyenne générale, en l'occurrence B13D2, S14D1 et B13D1 avec des rendements respectifs de 9536 Kg.ha<sup>-1</sup>, 9015 Kg.ha<sup>-1</sup>, 8055 Kg.ha<sup>-1</sup>.

**Tableau 3 :** Résumé de l'analyse de variance combinée et de la décomposition de l'interaction G x E selon AMMI.

Source de variation	DL	Grains (Kg.ha <sup>-1</sup> )		Biomasses paille (Kg.ha <sup>-1</sup> )	
		Carrée Moyen	Variance expliquée (%)	Carrée Moyen	Variance expliquée (%)
Génotype (G)	9	3409943***	32,8	144371591***	47,7
Environnement (E)	5	7712115***	41,2	89472372**	16,4
Blocs (E)	18	352673*	6,8	19792457***	13,1
Interaction (G x E)	45	400170***	19,2	13814779***	22,8
IPCA <sub>1</sub>	13	733183***	54,3	23600674***	59,3
IPCA <sub>2</sub>	11	389402*	24,4	11512314*	24,5
IPCA <sub>3</sub>	9	249314	12,8	5892251	10,3
IPCA <sub>4</sub>	7	121655	4,9	3881248	5,3
1PCA <sub>5</sub>	5	129493	3,7	708295	0,7
Erreur	157	188075		5497548	

DL= degré de liberté ;\*\*\*, \*\*, \* = significatif au seuil de 0,1 % et 1 % et 5 %

**Tableau 4 :** Rendement moyen en grains (Kg.ha<sup>-1</sup>) des dix génotypes sur les dix environnements étudiés.

Génotype	Environnements						Moyenne
	B13D1	B13D2	S13D1	S13D2	S14D1	S14D2	
FADDA	1662 <sup>ab</sup>	<b>804<sup>ab</sup></b>	<b>2329<sup>ab</sup></b>	<b>1855<sup>a</sup></b>	1604 <sup>ab</sup>	<b>2206<sup>a</sup></b>	<b>1743</b>
NIELENI	<b>2011<sup>a</sup></b>	<b>972<sup>a</sup></b>	<b>2445<sup>a</sup></b>	1742 <sup>ab</sup>	<b>2626<sup>a</sup></b>	1326 <sup>abc</sup>	<b>1854</b>
IS15401	665 <sup>bc</sup>	554 <sup>bc</sup>	2182 <sup>ab</sup>	1608 <sup>ab</sup>	1297 <sup>b</sup>	1008 <sup>bc</sup>	1219
PABLO	<b>1688<sup>ab</sup></b>	624 <sup>bc</sup>	2111 <sup>ab</sup>	1786 <sup>ab</sup>	1592 <sup>ab</sup>	<b>1806<sup>ab</sup></b>	1601
CSM63E	1423 <sup>abc</sup>	346 <sup>cd</sup>	1628 <sup>abc</sup>	<b>1895<sup>a</sup></b>	1918 <sup>ab</sup>	1634 <sup>ab</sup>	1474
SK5912	252 <sup>c</sup>	151 <sup>d</sup>	992 <sup>c</sup>	1071 <sup>b</sup>	459 <sup>c</sup>	358 <sup>c</sup>	547
GRINKAN	888 <sup>abc</sup>	502 <sup>bc</sup>	1323 <sup>bc</sup>	1475 <sup>ab</sup>	1677 <sup>ab</sup>	441 <sup>c</sup>	1051
SOUMBA	981 <sup>abc</sup>	553 <sup>bc</sup>	1016 <sup>c</sup>	1301 <sup>ab</sup>	<b>2307<sup>ab</sup></b>	900 <sup>bc</sup>	1168
621B	1367 <sup>abc</sup>	491 <sup>bc</sup>	1566 <sup>abc</sup>	1665 <sup>ab</sup>	1827 <sup>ab</sup>	1064 <sup>bc</sup>	1330
F2-20	1223 <sup>abc</sup>	409 <sup>cd</sup>	1549 <sup>abc</sup>	1302 <sup>ab</sup>	1658 <sup>ab</sup>	1110 <sup>bc</sup>	1208
Moyenne	1211	530	<b>1714</b>	1570	<b>1696</b>	1192	1320

Pour chaque colonne, les moyennes de même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de 5 %. Les valeurs en gras indiquent les deux meilleurs génotypes (environnements) en termes de rendement grain.

Tableau 5 : Rendement moyen en biomasses paille (Kg.ha<sup>-1</sup>) des dix génotypes dans les dix environnements étudiés.

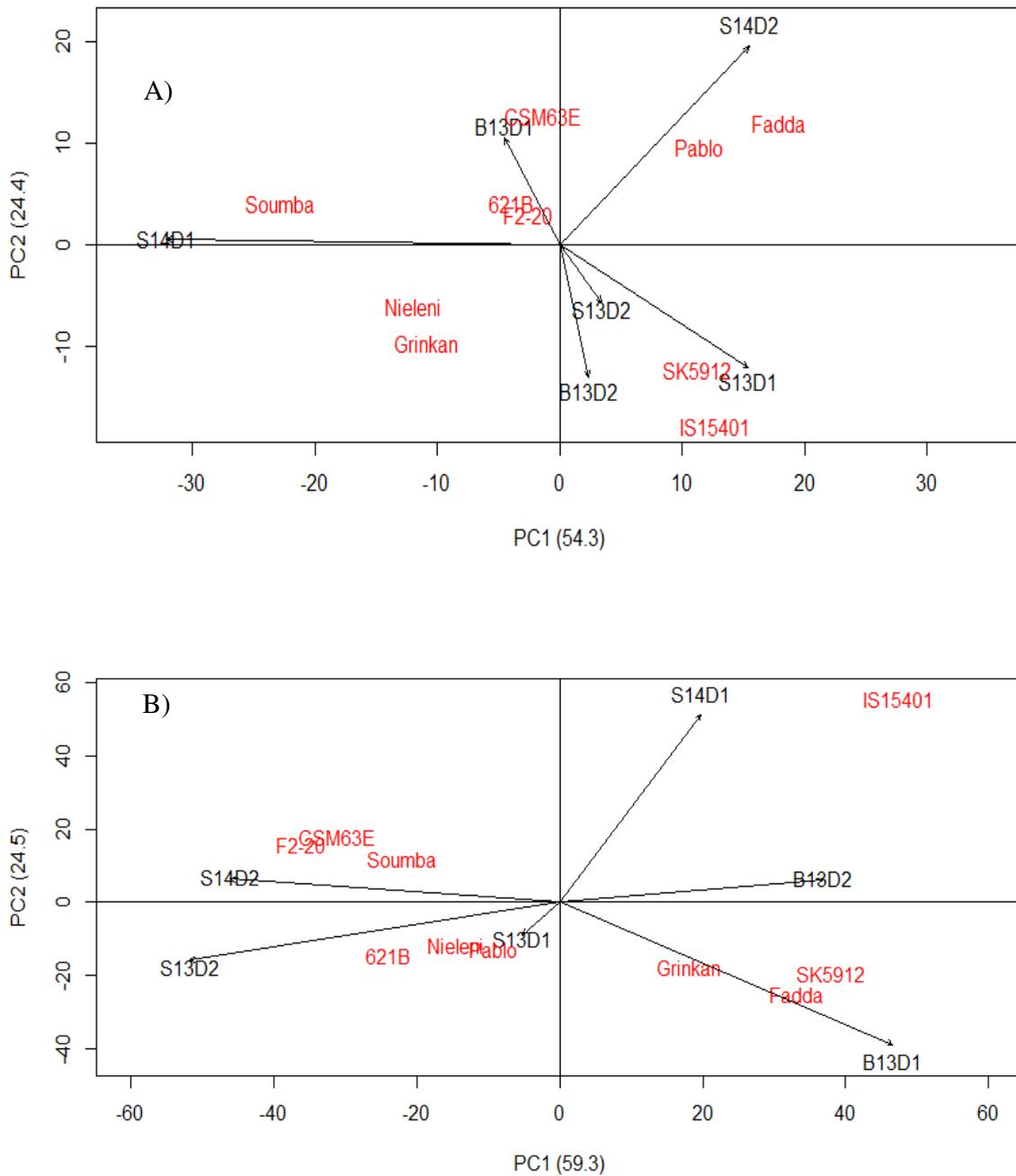
Génotype	Environnements						Moyenne
	B13D1	B13D2	S13D1	S13D2	S14D1	S14D2	
FADDA	11111 <sup>abc</sup>	10546 <sup>abc</sup>	<b>7571<sup>b</sup></b>	5409 <sup>abc</sup>	8900 <sup>c</sup>	4568 <sup>bc</sup>	8018
NIELENI	7667 <sup>abc</sup>	13322 <sup>ab</sup>	5617 <sup>bcd</sup>	6473 <sup>abc</sup>	7552 <sup>c</sup>	6981 <sup>abc</sup>	7935
IS15401	<b>12315<sup>ab</sup></b>	<b>15989<sup>a</sup></b>	<b>10611<sup>a</sup></b>	<b>7151<sup>ab</sup></b>	<b>17679<sup>a</sup></b>	<b>8871<sup>a</sup></b>	<b>12103</b>
PABLO	8137 <sup>abc</sup>	7198 <sup>bcd</sup>	7109 <sup>bc</sup>	5775 <sup>abc</sup>	8097 <sup>c</sup>	6263 <sup>abc</sup>	7096
CSM63E	3642 <sup>c</sup>	3051 <sup>d</sup>	4926 <sup>bcd</sup>	4529 <sup>c</sup>	7712 <sup>c</sup>	4020 <sup>c</sup>	4647
SK5912	<b>14806<sup>a</sup></b>	<b>13623<sup>ab</sup></b>	9827 <sup>a</sup>	<b>7480<sup>a</sup></b>	<b>12417<sup>b</sup></b>	<b>8783<sup>a</sup></b>	<b>11156</b>
GRINKAN	9675 <sup>abc</sup>	12020 <sup>abc</sup>	6870 <sup>bcd</sup>	4812 <sup>bc</sup>	8428 <sup>c</sup>	5010 <sup>abc</sup>	7803
SOUMBA	4756 <sup>bc</sup>	7497 <sup>bcd</sup>	4034 <sup>d</sup>	5109 <sup>bc</sup>	7270 <sup>c</sup>	5884 <sup>abc</sup>	5758
621B	3581 <sup>c</sup>	5955 <sup>cd</sup>	4300 <sup>cd</sup>	4889 <sup>bc</sup>	4239 <sup>c</sup>	6982 <sup>abc</sup>	4991
F2-20	4863 <sup>bc</sup>	7219 <sup>bcd</sup>	5261 <sup>bcd</sup>	5791 <sup>abc</sup>	7855 <sup>c</sup>	8171 <sup>ab</sup>	6527
Moyenne	8055	<b>9536</b>	6613	5742	<b>9015</b>	6531	7603

Pour chaque colonne, les moyennes de même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de 5 %. Les valeurs en gras indiquent les deux meilleurs génotypes (environnements) en termes de rendement biomasse paille.

**Analyse AMMI de l'interaction génotype-environnement (G x E) :** L'analyse AMMI de la variance à travers les six environnements a montré pour le rendement grains que 32,8 %, 41,2 % et 19,2 % de la somme totale des carrés des écarts ont été attribués respectivement aux génotypes, aux environnements et à l'interaction génotype-environnement. Pour le rendement en biomasses, une grande partie de la variabilité observée (54,0 %) a été attribuée aux génotypes et seulement 16,4 % et 22,8 % aux environnements et à l'interaction génotype-environnement. Pour la décomposition de l'interaction G x E selon le modèle AMMI, l'analyse a montré que les deux premières composantes principales de l'interaction ont été significatives (tableau 3) pour les deux rendements, et qu'elles expliquent respectivement 78,7 % et 83,8 % de la somme des carrés des écarts pour le rendement grain et le rendement biomasse paille (IPCA<sub>1</sub> et IPCA<sub>2</sub>). Ces résultats ont indiqué que les scores des génotypes et des environnements sur les deux premières composantes principales de l'interaction expliquent la presque totalité de l'interaction qui s'est présentée dans la matrice des données.

**Réponse et stabilité des génotypes selon le modèle AMMI :** Le graphe biplot AMMI<sub>2</sub> montre pour le rendement grain que les environnements S14D1, S14D2 et S13D1, du fait de leurs scores élevés, ont le mieux discriminé les performances des différents génotypes évalués et ont été une source significative de contribution à l'interaction (figure 2A). Cependant leurs moyennes à l'exception de S14D2 ont été parmi les plus élevées, ce qui indique que ce sont des environnements favorables pour obtenir des moyennes élevées. Par contre, B13D1, S13D2 et B13D2

ont contribué nettement moins à l'interaction et ont obtenu les plus faibles rendements à l'exception S13D2. De par leur position le long des deux axes (scores proches de zéro), 621B et F2-20 ont été les plus stables, et ils présentent un rendement inférieur à la moyenne générale pour F2-20 et très proche de la moyenne pour 621B. Par contre Fadda et Pablo, tous avec des rendements supérieurs à la moyenne générale, se sont montrés très instables du fait de leurs positions très éloignées de l'origine, avec une adaptation spécifique à l'environnement S14D2. Il en est de même pour SK5912 et IS15401 vis-à-vis de l'environnement S13D1 et Soumba pour S14D1, avec tous avec des rendements inférieurs à la moyenne générale. En ce qui concerne le rendement en biomasse, les environnements B13D1, B13D2, S13D2, S14D1 et S14D2 ont contribué fortement à l'interaction suite à leurs positions très éloignées de l'origine (figure 2B). Parmi ces environnements fortement interactifs, B13D1, B13D2 et S14D1 ont enregistré des rendements au-dessus de la moyenne globale. S13D1 s'est distingué par une faible contribution à l'interaction comme l'indique sa position proche de l'origine avec un rendement moyen au-dessus de la moyenne globale. Deux génotypes Nieleni et Pablo se sont révélés plus stables vu leurs positions proches de l'origine et parmi eux seul Nieleni a eu des rendements supérieurs à la moyenne générale. A l'opposé SK5912 et Fadda se sont révélés très instables, c'est-à-dire donc très sensibles aux interactions environnementales, avec des adaptations spécifiques à l'environnement B13D1 (figure 2B). Il en est de même pour IS15401 vis-à-vis de l'environnement S14D1. Par ailleurs ces trois génotypes ont obtenus des rendements supérieurs à la moyenne générale.



**Figure 2** : Biplot AMMI<sub>2</sub> des dix génotypes de sorgho et les six environnements (combinaison site-date de semis-année au Sénégal) pour les rendements grains (A) et biomasses paille (B). B13D1: date semis 1 Bambey, B13D2 : date semis 2 Bambey, S13D1 : date semis 1 Sinthiou Malem, S13D2 : date semis 2 Sinthiou Malem, S14D1 : date semis 1 Sinthiou Malem, S14D2 : date semis 2 Sinthiou Malem.

## DISCUSSION

L'analyse de la variance combinée a révélé des effets significatifs pour l'environnement, les génotypes et l'interaction génotype-environnement. Ceci confirme une diversité phénotypique parmi les génotypes évalués et que ces génotypes répondent différemment aux environnements. Ces résultats sont du même type que ceux d'Almeida Filho *et al.* (2014) et Showemimo *et al.* (2000) sur le sorgho. Les rendements des dix génotypes ont varié entre 547 Kg.ha<sup>-1</sup> et 1854 Kg.ha<sup>-1</sup> pour le grain et entre 4647 Kg.ha<sup>-1</sup> et 12103 Kg.ha<sup>-1</sup> pour la biomasse ; et ceux des environnements, entre 541 Kg.ha<sup>-1</sup> et 1696 Kg.ha<sup>-1</sup> en grain et entre 5742 Kg.ha<sup>-1</sup> et 9642 Kg.ha<sup>-1</sup> en biomasse (tableaux 4 et 5). D'une manière générale les rendements sont plus importants en date 1 de semis qu'en date 2, montrant l'importance potentielle d'une durée de cycle plus longue et l'existence d'une réponse à la photopériode des sorghos étudiés, comme cela a déjà pu être mis en évidence en Afrique de l'Ouest (Kouressy *et al.*, 2008). Les faibles rendements grain observés à Bambey en 2013 (B13D1 et B13D2) et à Sinthiou Malem en 2014 (S14D2) pourraient être expliqués entre autres par le caractère particulièrement sableux du sol, et par un complexe de maladies et/ou carences (signes observés mais non clairement identifiés), contraintes auxquelles les génotypes 621B, Grinkan, Soumba et F2-20 se sont montrés bien plus sensibles. A noter que ce sont tous des Caudatum qui sont des génotypes améliorés introduits au niveau des programmes nationaux de sélection du sorgho et qui sont connus pour être moins rustiques que les *Guinea* lorsque les conditions édaphiques ne sont pas idéales (Bazile *et al.*, 2008). Pour les essais de Bambey des stress hydriques en fin de cycle (découlant de problèmes avec le système d'irrigation) sont également survenus. Ils expliquent le très faible rendement du SK5912, et ils ont pu aggraver les effets des contraintes précédemment mentionnées. À l'heure actuelle, le modèle le plus utilisé est l'AMMI (Raton *et al.*, 1992; Raju, 2002; Zali *et al.*, 2012), qui implique à la fois l'Anova et l'analyse en composante principale afin de décomposer l'interaction G x E. Dans cette présente étude, les deux premières composantes principales de l'interaction ont été significatives (tableau 3) pour les deux rendements, et ont expliqué respectivement 78,7 % et 83,8 % de la somme des carrés des écarts pour le rendement grain et le rendement biomasse paille (IPCA<sub>1</sub> et IPCA<sub>2</sub>). Pour le grain, la première composante (IPCA<sub>1</sub>) a été fortement corrélée à la bonne fertilité du sol (S14D1 et S13D1) alors que la deuxième composante l'a été pour la pluviométrie (faible en S14D2). En ce qui concerne la biomasse paille,

l'IPCA<sub>1</sub> a été fortement corrélé positivement à B13D1 et B13D2 (bonne production malgré la maladie et le stress en fin cycle en B13D2 qui n'a pas affecté la biomasse) et négativement à S14D2 et S13D2 (bonne fertilité et dates tardives) alors que l'IPCA<sub>2</sub> a été positivement corrélé à S14D1 (bonne fertilité et faible pluviométrie). Deux génotypes pour le grain (621B, F2-20) et deux génotypes pour la biomasse (Nieleni et Pablo) ont été identifiés comme globalement plus stables selon ce modèle, mais ils ont par ailleurs montré, à l'exception de Nieleni, des rendements inférieurs à la moyenne à travers les différents environnements. Ces résultats corroborent ceux de Ménad *et al.* (2010) qui stipulent que la stabilité des rendements est indépendante de leurs valeurs, et que les génotypes au rendement élevé sont en général relativement peu stables alors que c'est généralement le contraire pour les génotypes au rendement moyen ou faible. Ils confirment aussi l'affirmation de Yan et Hunt (2002) qui indiquent que la stabilité globale n'est pas forcément un facteur positif et qu'elle n'est souhaitable que lorsqu'elle associe un rendement moyen élevé. En plus, l'analyse AMMI a révélé aussi pour le grain que les génotypes IS15401 et SK5912, Fadda et Pablo, Soumba ont été proches respectivement des environnements S13D1, S14D2 et S14D1 caractérisés par une bonne fertilité des sols alors que pour la biomasse les génotypes IS15401, SK5912 et Fadda ont été proches respectivement des environnements S14D1 et B13D1 caractérisés par une date de semis précoce, ce qui indique des adaptations spécifiques. A l'opposé, IS15401 était très peu adaptés aux environnements S14D2, S13D2, et il en a été de même pour SK5912 vis-à-vis de S14D2 pour la biomasse. Les adaptations spécifiques des génotypes de cycle long IS15401 et SK5912 à l'environnement S13D1 et de Soumba à S14D1 pourraient être dues à la fois aux dates de semis normale et aux bonnes conditions agro-pédologiques qui ont permis à ces génotypes d'enregistrer logiquement de meilleures performances même si S14D1 a été moins arrosé (tableau 1). Les très faibles adaptations de IS15401 et SK5912 aux environnements S13D2 et S14D2 pour la biomasse pourraient être imputées d'une part aux dates de semis tardives et d'autre part à la faible pluviométrie enregistrée dans ces environnements. La possibilité d'identifier des génotypes stables et des génotypes avec des adaptations spécifiques à certains environnements constituent un avantage important de la méthode AMMI comparativement aux autres méthodes couramment employées (Silva Filho *et al.*, 2008).

## CONCLUSION

Le rendement des cultures est un trait complexe qui est influencé par un certain nombre de facteurs associés à l'environnement, directement ou indirectement rendant difficile la sélection de sorghos stables à haut rendement pour divers environnements. Dans la présente étude, le modèle AMMI a montré que les rendements grains et biomasses ont fortement été influencés par les génotypes, les environnements et l'interaction génotype-environnement. Les environnements ont provoqués des réponses différentes des génotypes et la plupart de ces génotypes ont montré une spécificité environnementale. Nieleni et Fadda ont eu les rendements en grains les plus élevés en moyenne alors que IS15401 et SK5912 ont eu

les rendements les plus élevés en biomasse. Les génotypes F2-20 pour le grain et Pablo pour la biomasse ont été identifiés comme des génotypes avec une bonne stabilité phénotypique mais de faibles performances. Par contre les génotypes Fadda et Pablo, IS15401 et SK5912 pour le grain ont montré des adaptations spécifiques respectivement aux environnements S14D2 et S13D1. Pour la biomasse paille les cycles longs SK5912 et IS15401 ont été spécifiquement adaptés aux environnements B13D1 et S14D1 tous semés en date normale. Le modèle statistique AMMI peut être un excellent outil pour aider à recommander des génotypes de sorgho comme d'autres cultures.

## REMERCIEMENTS

Le premier auteur remercie le Centre d'Étude Régional pour l'Amélioration à l'Adaptation à la Sécheresse (CERAAS) qui lui a accordé cette opportunité pour la préparation de sa thèse de doctorat. Les travaux de terrain ont été financés par le PPAO/WAAPP (Programme de Productivité Agricole en Afrique de l'Ouest) à travers le Projet CERAAS (Développement de variétés de céréales adaptées aux conditions agro-

écologiques en Afrique de l'Ouest et répondant aux besoins des utilisateurs) et suivis au quotidien par Gabriel Diatta et M'Baye Sarr Diop. Nos remerciements vont également à l'endroit des équipes techniques du CERAAS à Bambey et de la station de Recherches ISRA/Sinthiou Malem (Sénégal) et à tous les autres agents desdits services.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Agrama, H.A. and Tuinstra, M.R., 2003. La diversité phylogénétique et les relations entre le sorgho adhésions à l'aide SSR et RAPD. *Africaine. J. Biotechnol.*, 2 (10) : 334-340.
- Almeida Filho, J.E., Tardin, F.D., Daher1, R.F., Barbé, T.C., Paula3, C.M., Cardoso, M.J., Godinho V.P.C., 2014: Stability and adaptability of grain sorghum hybrids in the off-season *Genet. Mol. Res.*, 13 (3): 7626-7635.
- Ba, K., Tine, E., Destain, J., Cissé, N., Thonart, P., 2010. Étude comparative des composés phénoliques, du pouvoir antioxydant de différentes variétés de sorgho sénégalais et des enzymes amylolytiques de leur malt. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.*, 14: 131-139.
- Bartlett, M. S., 1937. Properties of sufficiency and statistical tests. *Proceedings of the Royal Statistical Society. Series A*, 160: 268–282.
- Bazile, D., Dembélé, S., Soumaré, M., Dembele, D., 2008. Utilisation de la diversité variétale du sorgho pour valoriser la diversité des sols au Mali. *Cahiers Agricultures*, 17 : 86-94.
- Crossa, J., Gauch, H.G., Zobel, R.W., 1990. Additive main effect and multiplicative interaction analysis of two international maize cultivar trials. *Crop Science*, 30: 493-500.
- Djè, Y., Heuertz, M., Ater, M., Lefebvre, C., Vekemans, X., 2007. Évaluation de la diversité morphologique des variétés traditionnelles de sorgho du Nord-ouest du Maroc. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.*, 11 : 30-40.
- FAOSTAT., 2015. Statistiques des données année 2015, Rome, Italy. United Nations Food and Agriculture Organization, Rome.
- Gauch, H.G.; Zobel, R.W., 1996. AMMI analysis of yield trials. Chap. 4. p. 85–122. In : Kang, M.S.; Gauch, H.G., eds. *Genotype by environment interaction*. CRC Press, Boca Raton, FL, USA.
- Holts T., 1995. Analysis of genotype environment interactions. *South Afric J Sci.*, 91: 121-124.
- Kempton, R.A., 1984. The use of biplots in interpreting variety by environment interactions. *Journal of Agricultural Science*, 103: 123–135.
- Kouressy, M., Dingkuhn, M., Vaksman, M. and Heinemann, A.B., 2008. Adaptation to diverse semi-arid environments of sorghum genotypes having different plant type and sensitivity to photoperiod. *Agric. For. Meteorol.*, 148: 357-371.

- Menad, A., Meziani, N., Bouzerzour, H. and Benmahammad, A., 2010. Analyse de l'interaction génotype x milieux du rendement de l'orge (*Hordeum vulgare* L.) : application des modèles AMMI et la régression conjointe. *Nature & Technologie*, 05: 99-106.
- Raju, B.M.K., 2002. Study of AMMI model and its biplots. *Journal of the Indian Society of Agricultural Statistics* 55(3), 297-322.
- Raton, F.L., Gauch, H.G., 1992. *Statistical analysis of regional yield trials. AMMI Analysis of Factorial Designs*. Elsevier, New York.
- R Development Core Team., 2015. *R : A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing. Available at [<http://www.R-project.org/>] Accessed December 18, 2015, Vienna.
- Romagosa, I., Fox, P.N., 1993. Genotype x environment interaction and adaptation. In : *Plant Breeding : Principles and Prospects*. (Hayward, M.D., Bosemark, N.O., Romagosa, I., eds), Chapman & Hall, Londres pp : 373-390.
- Seguin, B., Soussana, J.F., 2008. Émissions de gaz à effet de serre et changement climatique : causes et conséquences observées pour l'agriculture et l'élevage. *Courrier de l'environnement de l'INRA*, 55: 79-91.
- Showemimo, F.A., Echekwu, C.A., Yeye, M.Y., 2000. Genotype x environment interaction in Sorghum trials and their implication for future variety evaluation in Sorghum growing areas of northern Nigeria. *The Plt. Scientist*, 1: 24-31.
- Silva Filho, J.L., Morello, C.L., Farias, F.J.C., Lamas, F.M., 2008. Comparação de métodos para avaliar a adaptabilidade e estabilidade produtiva em algodoeiro. *Pesq. Agropec. Bras.*, 43: 349-355.
- Vachaud, G., Dancette, C., Sonko, S., Thony, J.L., 1978. Méthode de caractérisation hydrodynamique d'un sol non saturé. Application à deux types de sols du Sénégal. *Annales Agronomiques* vol. 29, N°1 : 1-36.
- Yan, W. and Hunt, L.A., 2002. Biplot analysis of multi-environment trial data. In Kang MS (ed.). *Quantitative Genetics, Genomics and Plant Breeding*. Louisiana State University, Louisiana pp : 289-304.
- Zali, H., Farshadfar, E., Sabaghpour, S.H., Karimizadeh, R., 2012. Evaluation of genotype x environment interaction in chickpea using measures of stability from AMMI model. *Annals of Biological Research*, 3 (7) : 3126-3136.
- Zobel, R.W., Wright, M.W. and Gauch, H.G., 1988. Statistical analysis of a yield trial. *Agron J.*, 80: 388 -39