

UNIVERSITE CHEKH ANTA DIOP DE DAKAR

ECOLE DOCTORALE SCIENCES DE LA VIE, DE LA SANTE ET DE
L'ENVIRONNEMENT

FACULTE DES SCIENCES ET TECHNIQUES

Année : 2018

N° d'ordre : 71



THESE DE DOCTORAT

En Biologie, Physiologie et Pathologie Végétales

Spécialité : Production et Protection des Végétaux

Présentée par :

Malick NDIAYE

**Modélisation d'idéotypes variétaux de sorgho (*Sorghum bicolor* (L.)
Moench) sur la base de la caractérisation du fonctionnement et du
potentiel de sorghos multi-usages au Sénégal**

Soutenue le 18 Avril 2019 devant le jury composé de :

Président	M. Ibrahima NDOYE	Professeur titulaire FST/UCAD, Sénégal
Rapporteurs	M. Saliou NDIAYE	Maître de conférences ENSA/UT, Sénégal
	M. Madiama CISSE	Maître de recherches ISRA, Sénégal
	M. Daouda NGOM	Maître de conférences FST/UCAD, Sénégal
Examineurs	M. Bertrand MULLER	Chargé de recherches CIRAD, France
	Mlle Myriam ADAM	Chargée de recherches CIRAD, France
Directeur de thèse	M. Aliou GUISSSE	Professeur titulaire FST/UCAD, Sénégal

UNIVERSITE CHEKH ANTA DIOP DE DAKAR

ECOLE DOCTORALE SCIENCES DE LA VIE, DE LA SANTE ET DE
L'ENVIRONNEMENT

FACULTE DES SCIENCES ET TECHNIQUES

Année : 2018

N° d'ordre : 71



THESE DE DOCTORAT

En Biologie, Physiologie et Pathologie Végétales

Spécialité : Production et Protection des Végétaux

Présentée par :

Malick NDIAYE

**Modélisation d'idéotypes variétaux de sorgho (*Sorghum bicolor* (L.)
Moench) sur la base de la caractérisation du fonctionnement et du
potentiel de sorghos multi-usages au Sénégal**

Soutenue le 18 Avril 2019 devant le jury composé de :

Président	M. Ibrahima NDOYE	Professeur titulaire FST/UCAD, Sénégal
Rapporteurs	M. Saliou NDIAYE	Maître de conférences ENSA/UT, Sénégal
	M. Madiama CISSE	Maître de recherches ISRA, Sénégal
	M. Daouda NGOM	Maître de conférences FST/UCAD, Sénégal
Examineurs	M. Bertrand MULLER	Chargé de recherches CIRAD, France
	Mlle Myriam ADAM	Chargée de recherches CIRAD, France
Directeur de thèse	M. Aliou GUISSSE	Professeur titulaire FST/UCAD, Sénégal

Dédicaces

BISSMILLÂHI RRAHMÂNI RRAHÎM

Au nom d'ALLAH, le Miséricordieux, le tout Miséricordieux. Je remercie **le TOUT PUISSANT** pour m'avoir permis d'accomplir cette tâche et prie sur son **PROPHETE MOUHAMED** (PSL).

Je dédie ce travail à

Mon père pour son estime

Ma mère pour son affection

Mon épouse Ndéye FAYE pour sa compréhension et son soutien

Mon fils Abdou Karim NDIAYE

Mes frères et sœurs pour leur aide sans cesse

Au Doyen Moustapha Diop, retraité de l'ISRA/CRA Saint-

Louis

pour son soutien, il m'a toujours considéré comme son

fil

Mes amis

Tous les habitants de Bambey SERERE

Ma belle famille

Ce travail est le vôtre

Avant-propos

Les travaux de cette Thèse ont été menés au Centre d'Étude Régional pour l'Amélioration de l'Adaptation à la Sécheresse (ISRA/CERAAS, Thiès, Sénégal) en collaboration avec le Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD). Ce travail a été possible grâce au soutien du Programme de Productivité Agricole en Afrique de l'Ouest (WAAPP/PPAAO), sous financement de la banque mondiale et le Gouvernement du Sénégal et à l'Université Cheikh Anta Diop à travers la faculté des sciences et techniques et l'école doctorale Science de la Vie, de la Santé et de l'Environnement (UCAD/FST/ED-SEV) où cette thèse a été inscrite.

Nombreuses sont les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à ce travail et à qui nous voudrions rendre hommage à travers ces quelques lignes.

Tout d'abord je tiens à remercier infiniment l'Institut Sénégalais de Recherches Agricoles (ISRA) de m'avoir offert la possibilité de faire cette thèse mais également de m'avoir facilité le travail. Que Dr Alioune FALL, Directeur Général de l'ISRA trouve ici l'expression de mes sincères remerciements et ma grande reconnaissance. Mes remerciements vont aussi à l'encontre du Dr Ndiaga CISSE, Directeur du CERAAS. Vous m'avez appuyé financièrement, moralement et intellectuellement tout au long de ce travail. Soyer remercié pour cela. Je remercie vivement mon ancien et actuel Directeur du Centre de Recherches Agricoles (CRA) de Saint-Louis Dr Abdou Aziz MBAYE et Dr Amadou Abdoulaye FALL respectivement, pour m'avoir facilité la tâche.

J'adresse ma gratitude au Prof Aliou GUISSSE pour avoir accepté de diriger cette Thèse et son soutien, ses encouragements, sa disponibilité sans faille tout au long de notre formation de Doctorat. Prof Aliou GUISSSE a apporté sa touche inestimable de rigueur scientifique et d'orientations qui m'ont toujours permis de rester dans le sujet. A travers vous, j'exprime aussi toute ma gratitude à l'endroit des autorités de l'UCAD, de la FST et tout le personnel de l'école doctorale Science de la Vie, de la Santé et de l'Environnement (SEV) en particulier à Madame Fama DIOP pour son accompagnement académique.

Mes sincères remerciements aux membres du jury notamment au Prof. Ibrahima NDOYE président du jury, aux Drs Madiama CISSE, Daouda NGOM et Pr Saliou NDIAYE pour avoir accepté de rapporter ma thèse, pour leurs remarques et conseils avisés qui m'ont permis d'améliorer le manuscrit. Merci à tous pour l'intérêt que vous avez porté à ce travail, vos remarques et commentaires, et pour les échanges que nous avons pu avoir.

J'exprime ma profonde gratitude et rends un grand hommage à mes deux encadrants principaux Drs Bertrand MULLER et Myriam ADAM du CIRAD qui n'ont ménagé aucun effort pour la réalisation de ce travail mais aussi qui ont bien voulu partager avec moi leurs connaissances et leur savoir-faire. Vous avez fait preuve d'un soutien moral sans faille. Tout au long de ma formation à la recherche, j'ai pu bénéficier de vos expériences, de vos qualités sociales, scientifiques et de vos conseils judicieux. Votre rigueur scientifique et vos encouragements m'ont été et me seront toujours bénéfiques. Je n'oublierai jamais que Dr MULLER fut sur le terrain, le manager général des activités liées à la thèse. Au départ de Dr MULLER pour le Madagascar, Dr ADAM a pris la relève avec ses séjours de supervision et de travail au CERAAS-Thiès (deux fois l'an) et m'a accueilli par deux fois en séjours scientifiques à l'INERA de Bobo Dioulasso (Burkina Faso) et au CIRAD grâce à leur facilité financière. Avec Dr Myriam Adam, j'ai fait mes premiers pas et approfondi mes connaissances en modélisation des cultures. Je n'ai pas pu trouver les mots qu'il me faut pour vous remercier seulement je vous dis " merci beaucoup, *thank you very much, Gracias muchos, a ndiarama, choukrane, Diokka ndial* ".

Je remercie sincèrement tout le personnel scientifique du CERAAS : Dr Daniel Fonceka, Dr Bassirou Sine, Dr Alain Audebert, Dr Mame Codou, Dr Khalil Kane, Dr Amy Bodian, Dr Oury Diallo et Dr Ndjido Kane, Marème Niang-Belko pour leurs soutiens morales, matériels et intellectuels durant ma thèse. Mention spéciale à Dr Diariétou Sambakhé pour son aide dans les statistiques. Ma gratitude est aussi dirigée à l'endroit des membres du personnel administratif, comptable et technique, MM Mawa Sène, Sala Dior, Lakhat Gadiaga, Abdou Latif Diack, Khalidou Ba, Mbaye Ndoye Sall, Cheikhou Dramé, Idrissa Cissé, Maguette Seye, Mmes Mariama Senghor (maman DAAD), Thérèse Faye (Tante DAAD), Marie Fatou Sané, Elisabeth et Khady Diop, Joséphine Fofana, Rachelle Djiboune, Rose Diouf. Vos apports m'ont donné le courage d'aller jusqu'au bout. Soyez remerciées pour cela. Il nous est également agréable de remercier les chauffeurs du CERAAS. Nous pensons à Aly Égué Ka, Ibrahima Diouf, Saliou Gning, Malick Ndiaye (mon homonyme), Sidibé, Makha Dembelé et Jean-Michel Manga qui ont été mes compagnons de route lors des nombreuses missions de terrain.

J'exprime également ma reconnaissance à tous le personnel scientifique de l'ISRA/CRA de Saint-Louis : Dr Omar Ndaw FAYE (mon Grand et ancien de l'ENSA), Dr Ramatoulaye NDIAYE, Dr Diatta Marone, Dr Mamadou SALL, Dr Mamadou NDIAYE, Dr Thiaka DIOUF, Dr Djénaba SY, Dr Moussa DIENG, Souleymane DIALLO, Pape Madiama DIOP, Talla TALL, Amadou NDIAYE, Aminata Ba DIA, Fota DIEYE, Djibril TALL. Ma gratitude est aussi

dirigée à l'endroit des membres du personnel administratif, comptable et technique : Daba THIAM, Bacacar KANE (mon ami), Sala Dior MBAYE, Saïbane CISSOKHO, Ndéye Fatou SALL, Awa SY, Aïssata BA, Coumba FALL, Joséphine, Sokhna Adiara DIAGNE, Tabara BATHILY, Moussa SOW, Ahmadou Bamba FALL, Galéne SECK, Samba SADIO, Ousmane DIALLO et les autres que je ne pourrais pas citer car la liste est longue pour leurs soutiens morales, matériels et intellectuels durant la thèse. Vos apports m'ont donné le courage d'aller jusqu'au bout. Soyez remerciées pour cela.

Mes remerciements vont aussi aux étudiants-stagiaires : Yagouba Diao, Gabriel Jean Rel Diatta, Ousmane Aïdara, Cheikh Ndiaye, Fa Massiré Badji, Abdoul Aziz Diop, Moumini Diallo, Cheikh Samb, Moussa Touré, Alassane Diop, Christian Corneille Mbengue, Jules Nzalé, Edgar Bassène, Lama Diallo, Limamou Khoulé et Mamino Sané. Espoir Gaglo, Thierno Ndiaye, Bounama Mbengue, Demba Dia, Aimé Kantoussan, Médoune Diop, Yacouba DIAO, Mbaye Sarr Diop, aux techniciens Ibrahima Ndong, Papa NDIAYE, Abdou FAYE, Cheikh SENE et la main d'œuvre temporaire de Bambey Papa GAYE, Petit, Saliou SAMB qui ont activement participé à la collecte des données. Soyez infiniment remerciés.

Durant toutes ces années de thèse, nous avons eu à côtoyer des collègues thésards et des étudiants en master au CERAAS, CNRA/Bambey et à l'ISRA/CRA de Saint-Louis avec qui nous avons vécu de façon conviviale, et qui d'une manière ou d'une autre ont apporté leur contribution à ce travail. Nous faisons référence à Dr Roger Bayala, Dr Thierry Tovignan, Dr Paul Martial Kouakou, Dr Joël Nguempjop, Dr Aissatou Sambou, Dr Cyril Diatta, Dr Ghislain Kanfany, Dr Eyanawa Akata, Dr Demba DIAKHATE, Kyky Komla GANYO, Maguette Diop, Mame Balla Ndiaye, Awa sarr, Rahimi MBALLO, Pape Mactar GAYE, Amadou Tidiane SALL et les autres que je ne pourrais pas citer car la liste est longue.

J'adresse aussi mes remerciements au personnel scientifique du CNRA de Bambey pour leurs soutiens et conseils durant cette thèse. Je veux nommer Drs Issa FAYE, Aliou FAYE, Bocar Alpha BALDE, Ibrahima SARR et le doyen Amadou FOFANA.

Enfin j'adresse mes vifs remerciements à ma famille et à tous ceux qui de près ou de loin ont apporté leur pierre à l'édification de la présente œuvre et qui n'ont pas été nommément cités.

Résumé

En Afrique de l'Ouest, le sorgho constitue l'une des plus importantes céréales, base de l'agriculture vivrière de la population. 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. Ainsi, l'objectif global de cette thèse était de contribuer à faciliter ces choix en développant une démarche aboutissant à la modélisation d'idéotypes variétaux de sorgho qui pourra alors être utilisés pour raisonner des choix variétaux en relation aux environnements et usages. Pour ce faire, 10 génotypes contrastés de sorgho de la sous-région réputés tous performants dans leur zone d'origine ont été mis en expérimentation dans trois environnements cibles (Bambey, Sinthiou Malem et Nioro du Rip) pour une caractérisation approfondie et la compréhension de leur fonctionnement et potentialités sous différentes conditions (potentiels, interactions « génotype-environnement », plasticité) en termes de production en quantité de grain et de biomasse. Ce volet a été complété par une étude de modélisation qui a abouti à la définition d'idéotypes. Les résultats ont montré des effets des génotypes, des environnements et des interactions génotype-environnement très hautement significatifs ($P < 0,001$) sur les rendements grains et biomasses pailles. Les génotypes Nieleni et Fadda se sont distingués pour le double-usage dans la majorité des environnements et sont à recommander dans nos régions d'étude. Le génotype témoin sénégalais 621B a montré un très bon potentiel (car il peut produire plus de 3 t.ha^{-1}) dans de bonnes conditions agropédologiques (i.e. Sinthiou Malem). L'étude de la plasticité phénotypique et relation entre caractères d'intérêt et rendements a révélé que les caractères pour des sorghos double-usages comme la production de talles, le nombre de grains par panicule, le LAI et la longueur moyenne d'entrenœud ont été fortement plastiques et s'exprimaient mieux dans des environnements agropédoclimatiques favorables (comme Sinthiou Malem). D'autres caractères tels que la durée du cycle, le poids de mille grains, le nombre et la taille des feuilles et la grosseur de la tige sont facilement utilisables par la sélection car relativement moins influencés par les environnements. Un rendement élevé et stable en grains est apparu comme étant associé à une stabilité de la taille de feuille drapeau, de phénologie et de nombre de grains par panicule et celui en biomasse paille à une stabilité du diamètre de la tige. La calibration et l'évaluation du modèle de culture SAMARA a mis en évidence sa capacité à reproduire la plasticité phénotypique des génotypes étudiés malgré une sur-estimation des biomasses tige et totale et rendement en biomasse paille. Trois idéotypes (adapté à nos environnements cibles) ont été définis et ont montré des performances pour la double production supérieures à nos 10 génotypes étudiés ; ceci grâce à leur forte capacité à coloniser le sol (racines longues) et à maintenir une surface de feuilles verte (stay-green), caractères primordiaux pour avoir des idéotypes à double production dans nos environnements cibles surtout dans les zones les moins arrosées comme Bambey. Ces résultats pourront contribuer à l'amélioration du sorgho double-usage pour des environnements à faible pluviométrie.

Mots clés : Sorgho, interaction génotype x environnement, idéotype, SAMARA, double production, plasticité phénotypique

Abstract

In West Africa, sorghum is one of the most important cereals, the basis of the subsistence agriculture of the population. In Senegal, actions in favor of food security include the creation and / or introduction of new sorghum genotypes adapted to various environments in terms of soil and climate. Thus, the overall objective of this thesis was to contribute to facilitate these choices by developing an approach leading to the modeling of sorghum ideotype that can then be used to reason varietal choices in relation to environments and uses. To do this, 10 contrasting sorghum genotypes from the subregion, all of which are successful in their area of origin, were tested in three target environments (Bambey, Sinthiou Malem and Niore du Rip) for in-depth characterization and understanding of their functioning and potentialities under different conditions (potential, « genotype-environment » interactions, plasticity) in terms of grain and biomass production. This component was completed by a modeling study that resulted in the definition of ideotypes. The results showed highly significant effects ($P < 0,001$) for genotypes, environments and their interactions on grain and biomass straw yields. The Nieleni and Fadda genotypes have distinguished themselves for dual use in most environments and are recommended in our study areas. The Senegalese check genotype 621B showed a very good potential (because it can produce more than 3 t.ha⁻¹) in good agro-pedological conditions (i.e. Sinthiou Malem). The study of phenotypic plasticity and the relationship between traits of interest and yield revealed that characteristics for dual-use sorghums such as tiller production, number of grains per panicle, LAI, and mean internode length were highly plastic and expressed better in favorable agropedoclimatic environments (such as Sinthiou Malem). Other traits such as cycle time, thousand grain weight, number and size of leaves, and stem size are readily available for selection because they are relatively less influenced by environments. High, stable grain yield appeared to be associated with flag leaf size, phenology and number of grain per panicle stability and straw biomass stability at stem diameter stability. Calibration and evaluation of the SAMARA culture model demonstrated its ability to reproduce the phenotypic plasticity of the genotypes studied despite an over-estimation of stem and total biomass and yield of straw biomass. Three ideotypes (adapted to our target environments) were defined and showed performances for double production superior to our 10 studied genotypes; this thanks to their strong capacity to colonize the soil (long roots) and to maintain a green leaf surface (stay-green), characters that are essential for having double production ideotypes in our target environments, especially in the less watered areas like Bambey. These results may contribute to the improvement of dual-use sorghum for low rainfall environments.

Key-words : Sorghum, genotype x environment interaction, ideotype, SAMARA, double production, phenotypic plasticity

Table des matières

Dédicaces.....	i
Avant-propos.....	ii
Résumé.....	v
Abstract.....	vi
Table des matières.....	vii
Sigles et abréviations.....	xii
Liste des tableaux.....	xiv
Liste des figures.....	xv
Introduction générale.....	2
Chapitre 1 : Synthèse bibliographique.....	6
1.1 Importance économique et utilité du sorgho.....	7
1.1.1 Importance économique.....	7
1.1.2 Utilités du sorgho.....	7
1.2 Systématique du sorgho.....	8
1.3 Diversité génétique du sorgho.....	10
1.4 Morphologie.....	11
1.4.1 Organes végétatifs.....	12
1.4.1.1 Racines.....	12
1.4.1.2 Tige.....	13
1.4.1.3 Pédoncule.....	13
1.4.1.4 Feuilles.....	13
1.4.2 Organes reproducteurs.....	14
1.4.2.1 Panicule.....	14
1.4.2.2 Grain.....	14
1.5 Cycle de développement du sorgho.....	15
1.6 Qualités nutritionnelles et toxicité du sorgho.....	17

1.6.1	Qualités nutritionnelles	17
1.6.2	Toxicité du sorgho	18
1.7	Sorgho au Sénégal	18
1.7.1	Distribution géographique et système de culture	19
1.7.2	Amélioration variétale du sorgho au Sénégal	20
1.7.2.1	Objectifs de l'amélioration variétale	21
1.7.2.2	Acquis de l'amélioration variétale	22
1.8	Définition d'idéotype variétal.....	23
1.8.1	Définition du concept « idéotype »	23
1.8.2	Importance de l'idéotypage pour la sélection	23
1.8.3	Rôle de la modélisation dans l'idéotypage variétale.....	25
Chapitre 2 : Interaction génotype-environnement : compromis entre performances agronomiques, et stabilité de génotypes de sorgho (<i>Sorghum bicolor</i> L. Moench) double usage au Sénégal		
2.1	Résumé	28
2.2	Introduction	29
2.3	Matériel et méthodes	31
2.3.1	Site expérimentaux.....	31
2.3.2	Matériel végétal	31
2.3.3	Conduite des essais	31
2.3.4	Dispositif expérimental et variables mesurées.....	35
2.3.5	Analyses statistiques des données.....	35
2.4	Résultats.....	37
2.4.1	Caractéristiques des environnements	37
2.4.2	Effets des génotypes, environnements et interactions génotype x environnement..	39
2.4.3	Analyse AMMI de l'interaction génotype-environnement (G x E).....	41
2.4.4	Quel(s) génotype(s) pour quel(s) environnement(s) ?	42
2.4.5	Quel(s) génotype(s) montre(nt) une aptitude au double usage ?	45

2.5 Discussions	46
2.5.1 Quel(s) génotype(s) pour quel(s) environnement(s) ?	47
2.5.2 Choix de génotypes ayant une bonne aptitude au double usage	48
2.6 Conclusion	49
Chapitre 3 : Plasticité phénotypique du sorgho double usage : relations entre rendements en grains et en biomasse paille et caractères d'intérêt	51
3.1 Résumé	52
3.2 Introduction	53
3.3 Matériel et Méthodes	55
3.3.1 Sites expérimentaux	55
3.3.2 Matériel végétal	55
3.3.3 Mesures, observations et paramètres calculés.....	56
3.3.4 Analyse statistique des données.....	58
3.4 Résultats.....	59
3.4.1 Performances agronomiques des génotypes selon les caractères étudiés	59
3.4.2 Variation du rendement et des caractères contributifs	62
3.4.3 Plasticité phénotypique induite par les environnements	65
3.4.4 Relation entre plasticité phénotypique et rendements grain et biomasse paille.....	67
3.5 Discussions	69
3.5.1 Caractères clés pour des génotypes « double usage ».....	69
3.5.2 Implications associations et plasticité phénotypique des caractères étudiés pour la sélection	70
3.6 Conclusion	73
Chapitre 4 : Evaluation du modèle de culture SAMARA pour la prise en compte de la plasticité phénotypique de génotypes de sorgho au Sénégal.....	75
4.1 Résumé	76
4.2 Introduction	77
4.3 Matériel et Méthodes	79

4.3.1 Sites expérimentaux	79
4.3.2 Choix des sites pour calibration et évaluation	79
4.3.3 Description du modèle de culture	81
4.3.4 Calibration du modèle.....	84
4.3.4.1 Etapes de calibration et choix des paramètres.....	84
4.3.4.2 Procédure d'optimisation	87
4.3.5 Evaluation du modèle	87
4.4 Résultats.....	88
4.4.1 Phénologie.....	90
4.4.1.1 Calibration.....	90
4.4.1.2 Evaluation.....	90
4.4.2 Morphologie : Hauteur de la plante, nombre de feuilles et indice de surface foliaire	92
4.4.2.1 Calibration.....	92
4.4.2.2 Evaluation.....	93
4.4.3 Dynamique des biomasses	95
4.4.3.1 Calibration.....	95
4.4.3.2 Evaluation.....	95
4.4.4 Rendements grain et biomasse paille et ses composantes.....	98
4.4.4.1 Calibration.....	98
4.4.4.2 Evaluation.....	99
4.5 Discussion.....	102
4.5.1 Principales conclusions et qualité des données.....	102
4.5.2 Capacités du modèle SAMARA à la prise en compte de la plasticité phénotypique et des interactions génotype-environnements et à la définition d'idéotypes de sorgho.....	104
4.6 Conclusion	106
Chapitre 5 : Conception d'idéotypes de sorgho double-usages à hauts rendements en grains et en biomasses adaptés à divers environnements cibles du Sénégal.....	107

5.1 Résumé	108
5.2 Introduction	109
5.3 Matériel et Méthodes	111
5.3.1 Conception d'idéotypes de sorghos double-usages : choix des traits d'intérêt.....	111
5.3.2 Paramètres génotypiques utilisés pour l'optimisation	112
5.3.3 Méthode d'optimisation pour définir des idéotypes de sorghos double-usages	114
5.3.4 Analyse des performances des idéotypes.....	115
5.4 Résultats.....	116
5.4.1 Paramètres génotypiques des idéotypes pour la double production	116
5.4.2 Performances agronomiques des idéotypes de sorgho et aptitude à la double production	117
5.5 Discussions	119
5.5.1 Importance des paramètres génotypiques des idéotypes optimisés	119
5.5.2 Implication pour l'adaptation dans nos environnements cibles, pour les sélectionneurs et les agronomes.....	121
5.5.3 Limites de l'étude	122
5.6 Conclusion	123
Chapitre 6 : Discussion générale	124
6.1 Objectif et démarche méthodologique.....	125
6.2 Principaux résultats obtenus	126
6.3 Insuffisances du travail	128
Conclusion et Perspectives.....	129
Conclusion générale	130
Perspectives	132
Références bibliographiques	133
Annexes.....	I

Sigles et abréviations

AMMI	: <i>Additive Main effect and Multiplicative Interaction</i>
ANOVA	: Analyse de la Variance
ANSD	: Agence Nationale de la Statistiques et de la Démographique
APSIM	: <i>Agricultural Production Systems sIMulator</i>
CERAAS	: Centre d'Etude Régional pour l'Amélioration de l'Adaptation à la Sécheresse
CIRAD	: Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement
CMR	: Cameroun
CNRA	: Centre Nationale de la Recherche Agronomique
CNRS	: Centre Nationale de Recherches sur les Semences
CRA	: Centre de Recherches Agricoles
DNM	: Division Nationale de la Météorologie
DSSAT	: <i>Decision Support System for Agrotechnology Transfer</i>
ED-SEV	: Ecole Doctorale-Science de la Vie, de la Santé et de l'Environnement
FAO	: <i>Food and Agriculture Organization</i>
FAOSTAT	: <i>Food and Agriculture Organization Corporate Statistical Database</i>
FSPM	: <i>Functional-Structural Plant Modeling</i> (Modélisation fonctionnelle structurelle des plantes)
FST	: Faculté des Sciences et Techniques
I _c	: Indice de compétition interne
ICRISAT	: <i>International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics</i>
IER	: Institut d'Economie Rural
INERA	: Institut de L'Environnement et de Recherches Agricoles

IRAT	: Institut de Recherches Agronomiques Tropicales et des cultures vivrières
ISFAR	: Institut Supérieur de Formation Agricole et Rurale
ISRA	: Institut Sénégalais de Recherches Agricoles
LAI	: <i>Leaf Area Index</i> (Indice de surface foliaire)
LOASP	: Loi d’Orientation Agro-Sylvo-Pastorale
MLI	: Mali
NGR	: Nigéria
PPAAO	: Programme de Productivité Agricole en Afrique de l’Ouest
PSE	: Plan Sénégal Emergent
PAR	: <i>Photosynthetically Active Radiation</i> (Rayonnement Photosynthétiquement Actif)
RMAE	: <i>Relative Mean Absolute Error</i> (Moyenne de l’erreur absolue relative)
RRMSE	: <i>Relative Root Mean-Squared Error</i> (Racine de l’erreur quadratique moyenne relative)
RUE	: <i>Radiation Use Efficiency</i> (Efficacité d’Utilisation du Rayonnement)
SAMARA	: <i>Simulator of crop trait Assembly, Management Response and Adaptation</i>
SARRAH	: Système d'Analyse Régional des Risques Agroclimatiques – « Habillé »
SLA	: <i>Specific Leaf Area</i> (Surface massique des Feuilles)
SN	: Sénégal
UCAD	: Université Cheikh Anta Diop de Dakar
°Cj	: degré Celsius Jour
WAAPP	: <i>West Africa Agricultural Productivity Program</i>

Liste des tableaux

Tableau 1: Caractéristiques des différents sites d'essais.....	33
Tableau 2: caractéristiques des dix génotypes étudiés.....	34
Tableau 3: Résumé de l'analyse de variance combinée et de la décomposition de l'interaction G x E selon AMMI.....	40
Tableau 4: caractéristiques des dix génotypes étudiés.....	55
Tableau 5: Abréviation, définition et caractères étudiés.....	58
Tableau 6: Performance moyenne des caractères étudiés en relation aux rendements grain et biomasse des dix génotypes évalués	61
Tableau 7: Valeurs moyennes des caractères plastiques selon les environnements.	73
Tableau 8 : Liste des essais utilisés pour la calibration et l'évaluation du modèle.	80
Tableau 9 : Description des paramètres génotypiques du modèle choisis pour la calibration des dix génotypes de sorgho étudiés.....	86
Tableau 10 : Paramètres génotypiques calibrés pour les dix génotypes étudiés.....	89
Tableau 11: Indice de performance de l'évaluation du modèle pour les durées semis-floraison et semis-maturité pour les dix génotypes étudiés.....	91
Tableau 12: Indice de performance de l'évaluation du modèle pour la hauteur de la plante, le nombre de feuilles apparues et le LAI pour les dix génotypes étudiés.	95
Tableau 13 : Indice de performance de l'évaluation du modèle des biomasses feuille, tige et totale pour les dix génotypes étudiés.....	98
Tableau 14 : Indice de performance de l'évaluation du modèle pour les rendements et composante des dix génotypes étudiés.....	101
Tableau 15: Paramètres génotypiques utilisés pour l'optimisation de l'idéotype et leur plage de variation.	114
Tableau 16 : Paramètres génotypiques optimisés de l'idéotype conçu selon les environnements cibles.....	117
Tableau 17: Rendements moyens en grains et biomasse de l'idéotype et du génotype de référence à travers les environnements cibles.	118

Liste des figures

Figure 1: Schémas d'un plan de sorgho arrivé à maturité (d'après Clerget, 2004).....	12
Figure 2: Cycle de développement des céréales (d'après Belliard, 1982).	16
Figure 3: Carte montrant les principales zones de culture des cultures pluviales au Sénégal, dont celles du sorgho (en rouge) (source FAO, 1995).	20
Figure 4: Pluviométries et températures minimales et maximales des zones d'étude Bambey 2013 (A), Nioro du Rip 2015 (B) et Sinthiou Malem 2013 (C), 2014 (D), 2015 (E) et 2016 (F).	32
Figure 5: Analyse en composantes principales (PCA) des caractéristiques des environnements étudiés.....	38
Figure 6: Rendement moyen (moyenne des répétitions) en grains ($\text{Kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) de chacun des dix génotypes sur chacun des onze environnements étudiés et valeurs des moyennes génotypiques, environnementales et générales.....	40
Figure 7: Rendement moyen (moyenne des répétitions) en biomasses paille ($\text{Kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) de chacun des dix génotypes sur chacun des onze environnements étudiés et valeurs des moyennes génotypiques, environnementales et générales.	41
Figure 8: Biplot AMMI des rendements en grains des dix génotypes de sorgho et des onze environnements.	44
Figure 9: Biplot AMMI des rendements en biomasses paille des dix génotypes de sorgho et des onze environnements.	44
Figure 10: Comparaisons des aptitudes à la double production des dix génotypes sur les onze environnements d'étude via les indices I_{AP}	46
Figure 11: Analyses en composantes principales pour chacune des situations liaisons entre les rendements grains et biomasses et les différents caractères étudiés.	64
Figure 12 : Plasticité phénotypique des caractères reproductifs (A) et non-reproductifs (B) induite par l'environnement.	66
Figure 13 : Relations entre plasticités phénotypiques des traits et rendements en grains et en biomasses paille.....	68
Figure 14: Résultats de la calibration-évaluation des phénologies des trois génotypes les plus contrastés.	91
Figure 15 : Résultats de la calibration- évaluation de la hauteur de la plante pour les trois génotypes les plus contrastés.	93
Figure 16 : Résultats de la calibration- évaluation du nombre de feuilles apparues pour les trois génotypes les plus contrastés.....	94

Figure 17: Résultats de la calibration- évaluation du LAI de la plante pour les trois géotypes les plus contrastés.....	94
Figure 18 : Résultats de la calibration-évaluation de la biomasse feuille pour les trois géotypes les plus contrastés.....	96
Figure 19 : Résultats de la calibration- évaluation de la biomasse tige pour les trois géotypes les plus contrastés.....	97
Figure 20 : Résultats de la calibration-évaluation de la biomasse totale pour les trois géotypes les plus contrastés.....	97
Figure 21 : Résultats du processus de calibration-évaluation du rendement en grain pour les trois géotypes contrastés étudiés.	100
Figure 22 : Résultats du processus de calibration-évaluation du rendement en biomasse paille pour les trois géotypes contrastés étudiés.	100
Figure 23 : Résultats du processus de calibration-évaluation du nombre de grain par panicule pour les trois géotypes contrastés étudiés.	101
Figure 24: Rendements en grains observés et simulés des dix géotypes étudiés à travers nos environnements d'étude.	105
Figure 25: Rendements en biomasse paille observés et simulés des dix géotypes étudiés à travers nos environnements d'étude.	106
Figure 26 : Comparaisons des aptitudes à la double production des 3 idéotypes et du géotype de référence Nieleni sur les 3 environnements cibles via les indices I_{AP}	118

Introduction générale

Introduction générale

Au Sénégal, l'agriculture constitue la principale activité du secteur primaire. Elle occupe plus de la moitié de la population du pays et contribue pour environ 1/5 au produit intérieur brut (Durufle, 1996). On dénombre dans le pays, 3,8 millions d'hectares de terres arables (environ 20 % de la superficie du Sénégal) dont 65 % sont effectivement mis en valeur chaque année. Le paysage agraire est à 98 % dominé par les cultures pluviales (FAO, 2011). L'agriculture sénégalaise est de ce fait fortement tributaire de la pluviométrie et de ses aléas.

Situé en grande partie dans la zone soudano-sahélienne, le Sénégal est soumis à un climat de type semi-aride tropical fortement fluctuant dans le temps et dans l'espace (Baron *et al.*, 2005; Sultan *et al.*, 2008 ; IPCC, 2007). En effet, ces zones soudano-sahéliennes d'Afrique de l'Ouest sont depuis toujours affectées par la variabilité importante inter- et intra-annuelle de la pluviométrie (Sivakumar, 1988). Les impacts se sont aggravés à partir de 1970 avec la diminution des précipitations, qui s'est traduit par une descente des isohyètes de près de 200 km et a bouleversé les systèmes et choix variétaux (Diop, 1996 ; Traoré *et al.*, 2000). Depuis plus de 15 années on assiste cependant à une remontée des précipitations, qui toutefois n'atteint pas les niveaux antérieurs, ni ne se traduit par un allongement de la saison des pluies, mais plutôt par une mauvaise répartition des pluies (Salack *et al.*, 2011). Même s'il est difficile de prédire si cette tendance perdurera, le changement climatique global se traduira par une variabilité tout aussi forte des précipitations, accompagnée de températures plus élevées (IPCC, 2007), conjecturant des risques importants de périodes de sécheresse et des incertitudes à gérer pour les cultures (Sultan *et al.*, 2013).

Les agriculteurs se sont adaptés aux risques par des systèmes naturellement « résilients » (Kouressy *et al.*, 2008 ; Tittonell and Giller, 2013), reposant sur des variétés de mil et sorgho adaptées aux faibles pluviométries, à leur variabilité (de par leur caractère photopériodique), à des sols pauvres, et ce avec une gestion prudente de la fertilité pour ne pas s'exposer trop fortement aux risques hydriques. Ces variétés sont robustes, de hautes tailles en général, et avec des indices de récolte faibles, ce qui reflète l'intérêt des agriculteurs pour la production de pailles (alimentation du bétail, usages divers). L'amélioration variétale a cherché à répondre à la baisse des précipitations par le raccourcissement des cycles et la résistance à la sécheresse (Dingkuhn *et al.*, 2006), et en voulant augmenter la productivité des systèmes. Cependant les paysans ont faiblement adopté les variétés de la recherche et peu intensifié les cultures céréalières pluviales (Weltzien *et al.*, 2008). Pourtant l'augmentation de la productivité est inéluctable, ce malgré le contexte climatique incertain et risqué, car la population africaine va

croître d'un facteur 2,5 environ d'ici 2050. Les développements récents du maraîchage, du maïs et du riz, en lien avec la remontée de la pluviométrie, les tensions sur les marchés internationaux et l'évolution des demandes urbaines et des industries agroalimentaires, témoignent par ailleurs du dynamisme des agriculteurs. C'est dans ce cadre que les programmes de sélection du sorgho en Afrique de l'Ouest ont introduit des variétés améliorées de sorgho ayant différentes caractéristiques appréciées. Des variétés photopériodiques *guinea* de taille réduite et à indice de récolte amélioré furent développées pour répondre à l'intensification des zones cotonnières au Sud Mali (Weltzien *et al.*, 2008) ; des variétés précoces (i.e. évitement de la contrainte hydrique) *caudatum et guinea* double usage (grain+fourrage) pour les zones agro-pastorales du Nord Burkina (vom Brocke *et al.*, 2008 et 2010) et également au Sénégal. Et enfin des variétés semi-précoces *guinea* double usage (grain+fourrage ou autres usages) pour la zone nord-cotonnière à l'Ouest Burkina (Barro-Kondombo *et al.*, 2008). Des sorghos multi-usages « sucrés-fourragers » ont aussi été développés au Mali, et diverses résistances (ravageurs) et adaptations aux stress sont intégrées dans des variétés élites du Mali (Borrell *et al.*, 2010). Au Sénégal, des travaux sont en cours sur des sorghos de cycle court pour améliorer leur résistance aux moisissures paniculaires ainsi que la qualité de grains. On cherche en particulier à diminuer leur teneur en tanins afin de les rendre plus acceptables pour les consommations humaine et animale et l'agro-industrie (Cissé, com. pers.).

Dans ce contexte risqué et changeant, le sorgho a une place plus importante à prendre au Sénégal où il est relativement peu cultivé comparativement au Mali et au Burkina Faso. Présent en Afrique de l'Ouest entre les isohyètes 400 et 1200 mm, sa culture est concentrée au Sénégal dans le Centre-Sud et le Sud-Est, avec des superficies qui ont varié ces cinq dernières années entre 250 000 et 221 329 hectares pour des productions nationales allant de 250 000 à 225 865 tonnes (ANSD, 2018). De nouvelles variétés de sorgho, aux avantages multiples, pourraient certainement être d'intérêt pour les populations et les industries agroalimentaires. Elles contribueraient à la diversification des ressources possibles pour les paysans, en particulier dans les zones recevant moins de 800 mm où elles représenteraient une solution moins risquée et moins exigeante en intrants que le maïs tout en restant assez productive, et apparaîtraient comme une stratégie d'adaptation pour les agriculteurs à la variation et au changement climatiques. Le développement de sorghos multi-usages pourrait contribuer aussi à la « diversification et au développement de l'entrepreneuriat agricole pour répondre aux demandes alimentaires nationale et internationale » tel que cela est souhaité par l'Etat sénégalais avec le Plan Sénégal Emergent (PSE) lancée en 2014, et aux objectifs «

d'amélioration de la sécurité alimentaire et des revenus des populations rurales » mis en avant dans la Loi d'Orientation Agro-Sylvo-Pastorale (LOASP) de 2004.

La variabilité phénotypique élevée du sorgho permet son utilisation pour des usages très divers. Le sorgho peut à la fois être utilisé pour l'alimentation humaine, ou animale, et sa paille (feuilles et tiges) valorisée pour l'alimentation animale et d'autres usages (Rattunde *et al.*, 2011). De plus, depuis peu, la filière met aussi l'accent sur l'utilisation de la biomasse à des fins énergiques, essentiellement via le développement de nouveaux sorghos sucrés. L'intérêt du sorgho réside dans le fait que ces usages font intervenir différents organes de la plante, et donc le développement de variétés combinant la production de grains et de tiges permet aux paysans de valoriser cette culture pour leur subsistance ainsi que de diversifier leurs sources de revenus (Dicko *et al.*, 2006). La valorisation de différents organes (feuilles, tiges, grains), dont découle la diversification des productions du sorgho, repose sur des mécanismes d'allocation des ressources carbonées entre ces compartiments et leur régulation par l'environnement (par exemple déficit hydrique post-floral qui va affecter le remplissage des grains). La sélection de variétés dédiées à une ou plusieurs productions revient à sélectionner pour la capacité d'allouer la ressource carbonée aux compartiments cibles dans un environnement donné. La compréhension des processus orchestrant ces allocations est donc essentielle pour expliquer la diversité et les fonctionnements des phénotypes et par suite pour appuyer les recommandations de types de variétés en relation à l'environnement et pour orienter la conception de variétés à sélectionner pour l'avenir.

Sur la base de ce qui précède, la question qui est donc posée est celle de comment choisir les nouvelles variétés de sorgho à introduire et/ou à développer par la sélection, qui soient bien adaptées aux conditions locales tout en présentant des caractéristiques d'intérêt pour les populations et les industries agroalimentaires ?

La thèse se propose de contribuer à faciliter ces choix en développant une démarche aboutissant à la modélisation d'idéotypes variétaux de sorgho qui pourront alors être utilisés pour raisonner des choix variétaux en relation aux environnements et usages. Le travail concerne différentes régions cibles du Sénégal. Il repose tout d'abord sur une caractérisation expérimentale approfondie et la compréhension du fonctionnement et des potentialités de 10 géotypes sorghos multi-usages sous différentes conditions (potentiels, interactions « géotype-environnement », plasticité) en termes de production en quantité de grain et de biomasse. Ce volet est complété par une étude de modélisation qui aboutit à la définition d'idéotypes. Spécifiquement la thèse vise à :

- ✚ développer une analyse approfondie des interactions génotype-environnement en divers sites du Sénégal, pour évaluer les compromis entre performances agronomiques et stabilité des rendements en grains et paille ;
- ✚ identifier des types de plante (grain, biomasse et double production) et les caractères contribuant à ces types, mais aussi leur plasticité phénotypique ;
- ✚ calibrer et évaluer le modèle de culture SAMARA dans sa reproduction de la plasticité phénotypique des caractères étudiés ;
- ✚ concevoir *in silico* via des simulations un idéotype variétal de sorgho double-usage adapté aux environnements cibles.

Le présent document est structuré en 6 chapitres. Le premier chapitre (1) est une synthèse bibliographique focalisée sur la systématique du sorgho, son importance, ses exigences écologiques et sur la définition d'idéotypes variétaux et l'importance de la modélisation pour cela. Le second chapitre (2), présente les résultats des expérimentations conduites en divers sites du Sénégal au cours des années 2013, 2014, 2015 et 2016 et développe une analyse approfondie des interactions génotype-environnement pour évaluer les compromis entre performances agronomiques et stabilité des rendements grain et paille des 10 géotypes de sorghos (cf. objectif spécifique 1). Le troisième chapitre (3) vise sur la base des performances agronomiques et stabilité des 10 géotypes mis en avant dans le second chapitre, à caractériser leurs développements en différents sites, à identifier différents idéotypes (plant-type) et leurs caractères d'intérêt potentiel pouvant aider au développement d'un sorgho double usage (grain et biomasse), mais aussi leur plasticité phénotypique (cf. objectif spécifique 2). Le quatrième chapitre (4) vise à confronter le modèle de culture SAMARA aux données expérimentales des quatre années, évalue et identifie les points d'améliorations du modèle pour la reproduction de la plasticité phénotypique des 10 géotypes de sorgho en termes de phénologie, de production de biomasse et de grain au Sénégal (cf. objectif spécifique 3). Le cinquième chapitre (5) vise à la conception *in silico* d'idéotypes variétaux de sorghos double-usages adaptés aux environnements cibles visés à l'aide du modèle de culture SAMARA - calé et validé sur nos 10 géotypes au chapitre 4 - (cf. objectif spécifique 4). Enfin, le chapitre six (6) est une discussion générale ressortant les résultats majeurs et les limites de cette étude. Il débouche sur une conclusion et les perspectives pour une meilleure prise en compte des interactions génotypes et environnements et de la plasticité phénotypique dans la sélection variétale, et une bonne représentation des observations par le modèle de culture SAMARA.

Chapitre 1 : Synthèse bibliographique

1.1 Importance économique et utilité du sorgho

1.1.1 Importance économique

Le sorgho (*Sorghum bicolor* [L.] Moench) est une céréale qui a été domestiquée en Afrique. Il est bien adapté aux régions tropicales semi-arides en raison de sa rusticité et de ses besoins modérés en eau. Avec le mil pénicillaire, il a été et demeure une plante essentielle en Afrique où il est toujours un aliment de base pour des centaines de millions de personnes. Diffusé hors de son continent d'origine et progressivement acclimaté aux zones tempérées, le sorgho tient aussi une place notable dans l'agriculture de certains pays émergents et développés où il est surtout cultivé à des fins d'alimentation animale. Avec une production estimée en 2016 à 63 930 558 tonnes (FAOSTAT, 2016), le sorgho est la 5e céréale mondiale. Les Etats Unis à eux seuls détiennent 19 % de la production mondiale et sont suivis du Nigeria (11 %) et du Soudan (10 %) (FAOSTAT, 2016). L'Afrique détient plus de la moitié (55 %) de la production mondiale (Chepng'etich *et al.*, 2014; Wu *et al.*, 2014).

1.1.2 Utilités du sorgho

Le sorgho est surtout cultivé pour son grain et sa paille. En fonction de son utilisation, on peut distinguer deux types de pays. Au niveau des pays en développement, le grain de sorgho récolté est presque exclusivement destiné à la consommation humaine contrairement aux pays industrialisés où la consommation est exclusivement animale. En Afrique, où la part de la population rurale reste voisine de 70 %, l'essentiel de la récolte est autoconsommée. La paille de sorgho, un sous-produit intéressant, est utilisée dans l'alimentation des animaux ou peut servir de combustible ou de matériau de construction. Le grain peut être consommé entier ou concassé (couscous au Sénégal) et bouilli, ou moulu pour donner une farine qui sera utilisée pour une préparation épaisse non fermentée (le tô), une bouillie claire plus ou moins fermentée (ogi au Nigéria et Ghana), des galettes (waisna au Nigéria) ou des beignets (tubani et ganda au Nigéria). Le décorticage et la mouture sont traditionnellement effectués au pilon par les femmes.

En outre, plusieurs études ont été menées pour évaluer les possibilités d'utiliser le sorgho pur ou en mélange avec d'autres céréales pour la brasserie (Espinosa-Ramírez *et al.*, 2014; Nnamchi *et al.*, 2014; Schnitzenbaumer *et al.*, 2014), qui ont montré que l'on pouvait faire des bières d'excellente qualité à base de sorgho. De même, le sorgho est valorisé à travers la production de boissons traditionnelles (dolo, tchoucoutou, tchakpalo, etc.) issues de la fermentation du mout en Afrique de l'Ouest notamment au Burkina Faso, au Mali et au Bénin (Kayodé *et al.*, 2012; Lyumugabe *et al.*, 2012; Pale *et al.*, 2010). Au Sénégal, Ba *et al.* (2010) ont dosé les

activités des enzymes amylolytiques des malts des variétés locales et déterminé leur pouvoir antioxydant dans une perspective de valorisation en brasserie. Cette étude a abouti à identifier la variété sénégalaise F2-20 comme présentant les meilleures potentialités de maltage. Par ailleurs, plusieurs études ont été menées sur l'incorporation de la farine de sorgho, qui a l'avantage d'être sans gluten, dans la farine de blé pour la panification et la pâtisserie (Seleem et Omran, 2014 ; Velázquez *et al.*, 2012). Elles ont abouti à des produits bien appréciés des consommateurs notamment au Sénégal.

Le sorgho sucrier peut être utilisé pour la production de bioéthanol grâce au sucre accumulé dans ses tiges et est une alternative à la canne à sucre dans des environnements à fortes contraintes hydriques. Sa capacité à la double voire la multi-production (sucre, grain, fourrage) minimise les compétitions, d'une part pour les terres arables (entre la culture des ressources agro-énergétiques et alimentaires) et d'autre part pour l'utilisation des ressources alimentaires à des fins de biocarburants (Calviño et Messing, 2012 ; Harvey et Pilgrim, 2011 ; Valentine *et al.*, 2012). Ainsi, les risques liés à l'insécurité alimentaire, notamment dans les pays en développement, sont minimisés.

D'autres usages non moins importants sont faits du sorgho : l'utilisation des fibres cellulosiques pour fabriquer du papier ou de panneaux de construction, celle des pigments anthocyaniques dans la teinture et la vannerie et enfin celle de l'amidon des grains pour les colles et des adhésifs (Gençer et Şahin, 2015).

1.2 Systématique du sorgho

On ne considère que le sorgho [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] a pour origine le Nord-Est de l'Afrique et qu'il a été domestiqué environ 3000 ans avant J-C en Ethiopie et au Congo avec, comme centre d'origine secondaire, l'Inde, le Nigéria et le Soudan où il servait dans l'alimentation humaine (Habindavyi, 2009). Il a été décrit pour la première fois en 1753 par Linné sous le nom de *Holcus*. Moench (1794). Linné fut le premier à définir le genre *Sorghum* et l'espèce *bicolor* après l'avoir séparé du genre *Holcus* (Dahlberg *et al.*, 2011). La première classification prenant en compte l'ensemble des sorghos sauvages et cultivés du genre *Sorghum*, a été établie par Snowden (1936). Cette classification inclut 52 espèces (28 cultivées et 24 sauvages) regroupées en deux sous genres. La classification la plus utilisée aujourd'hui est celle de Harlan and de Wet (1972). Elle divise les sorghos cultivés (*Sorghum bicolor* sous - section *bicolor*) en cinq races principales et dix races intermédiaires (combinaisons deux à deux des

principales) selon les caractéristiques de la panicule et de l'épillet (Mekbib, 2007). Les cinq races principales sont décrites ci-dessous :

- ✚ *bicolor*, répartie dans l'ensemble des zones de culture en Afrique et en Asie. Ce sont les sorghos aux caractères les plus primitifs. Leur panicule est généralement lâche et leurs grains sont très petits et entièrement enveloppés par des glumes de grande taille et fermées. On y trouve des sorghos à balai, des sorghos papetiers et des sorghos fourragers ;
- ✚ *caudatum*, représentée au Soudan, Tchad, Nigéria et Ouganda. Leur panicule a une forme variable, mais avec une tendance de panicule compacte. Leurs grains sont dissymétriques, aplatis sur la face ventrale et bombés sur la face dorsale. Ils produisent beaucoup de grains souvent farineux et de médiocre qualité ;
- ✚ *durra*, majoritaire en Inde et au Moyen-Orient et très présente en Afrique de l'Est. Ils ont une panicule compacte souvent portée par un pédoncule croisé. Les glumes sont petites et collées sur des grains globuleux. Ils se distinguent par la grosseur de leurs grains et leur résistance à la sécheresse ;
- ✚ *guinea*, race typique de l'Afrique de l'Ouest, qui est aussi présente en Afrique de l'Est et du Sud. La panicule est lâche et porte des épillets dont les glumes généralement « baillantes » sont longues et renferment un grain elliptique. Ils sont bien adaptés aux zones pluvieuses ;
- ✚ *kafir*, race essentiellement présente en Afrique du Sud et de l'Est (au sud de la Tanzanie). Ce sont des sorghos peu diversifiés, de taille plutôt courte, peu ou non photopériodiques. Le grain est symétrique et les glumes de taille variable. La panicule est relativement compacte et cylindrique. Ils sont intéressants pour leur précocité.

Les dix races intermédiaires sont : *guinea-bicolor*, *guinea-caudatum*, *guinea-kafir*, *guinea-durra*, *caudatum-bicolor*, *kafir-bicolor*, *durra-bicolor*, *kafir-caudatum*, *durra-caudatum* et *kafir-durra*. Le sorgho appartient à l'embranchement des angiospermes, la classe des monocotylédones, l'ordre des Glumales, la famille des Poaceae, la tribu des Andropogoneae et au Genre Sorghum. Il est diploïde avec pour nombre chromosomique $2n=20$. Cependant, il existe deux autres espèces qui sont tétraploïdes dont certaines formes sont employées comme fourrage (*S. halepense* et *S. alnum*) (Price et al., 2005).

1.3 Diversité génétique du sorgho

La diversité génétique est la variabilité des gènes existant entre les individus d'une même espèce ou d'une population (Trouche *et al.*, 2008). Sa connaissance permet de mieux comprendre les processus évolutifs de l'espèce et renseigne sur son histoire démographique et génétique. Il est indispensable de comprendre ces processus afin de pouvoir proposer des stratégies de maintien et d'exploitation durable de ces ressources dans les conditions naturelles ou artificielles. Bien que la richesse variétale du sorgho permette de mettre en valeur un grand nombre d'agroécosystèmes, dont notamment des milieux à fortes contraintes agricoles, nombre de travaux sur sa diversité génétique ont mis en exergue sa perte progressive due aux réalités actuelles des zones rurales. Par exemple le cas du Sud Mali est particulièrement symptomatique et alarmant, avec la perte de 60 % de la diversité variétale du sorgho ces vingt dernières années. Dans cette région c'est en raison de la faible productivité des variétés locales de sorgho que les paysans l'ont délaissé au profit d'autres spéculations qui se sont révélées plus rentables, notamment le maïs (Bazile et Soumaré, 2004). Ceci a cependant motivé la mise en place d'un système semencier paysan associant généticiens et sociologues pour une meilleure appréhension des besoins du monde rural afin de déboucher sur des solutions plus adaptées tenant compte de la préservation des variétés locales, de la diffusion des variétés améliorées et de la gestion raisonnée des semences (Bazile *et al.*, 2008).

Par contre, l'étude de la diversité génétique menée par Médraoui *et al.* (2007) au nord-ouest du Maroc sur 398 individus de diverses provenances de sorgho a montré une variabilité élevée et que l'environnement micro-géographique a influencé cette variabilité génétique. En revanche, Djè *et al.* (2007) ayant évalué la variabilité dans la même zone en considérant les caractères morphologiques et les allozymes, n'ont pu relever l'influence de l'environnement. Au Burkina Faso, les diversités agro-morphologique et génétique des variétés locales ont été étudiées. Il a été noté une diversité agro-morphologique importante influencée faiblement par l'environnement (Barro-Kondombo *et al.*, 2010). La diversité inter-variétale est plus faible que celle intra-variétale au regard de l'indice de diversité qui est de 0,37 contre 0,53 (Barro-Kondombo *et al.*, 2010). Ainsi, toutes les variétés ont présenté à des degrés divers de la diversité intra-variétale. Au Niger, l'évolution de la diversité génétique a été évaluée entre 1976 et 2003 à travers une collection de 450 accessions dans 71 villages représentatifs des conditions pluviométriques et agro-écologiques. Les résultats ont montré une différenciation génétique très faible entre 1976 et 2003. Ainsi, contrairement aux hypothèses des généticiens, il n'y a pas eu

d'érosion génétique mais plutôt une stabilisation voire une augmentation de la diversité au cours de cette période de 27 ans (Deu *et al.*, 2010).

Au Sénégal, plusieurs travaux se basant sur les caractéristiques agro-morphologiques ont mis en évidence une variabilité au niveau de différentes variétés du sorgho. Par exemple les études réalisées au CERAAS ont mis en évidence une diversité au niveau du système racinaire et ont pu identifier ce dernier comme critère pertinent et facile d'accès pour évaluer l'adaptation des variétés du sorgho à la sécheresse (Sine, 2009).

1.4 Morphologie

La morphologie générale d'un plant de sorgho cultivé arrivé à maturité est illustrée par la figure 1. Le plant comporte une tige principale. Celle-ci peut présenter un certain nombre de tiges secondaires partant de sa base, appelées talles basales. Chaque tige est constituée d'un empilement d'unités morphologiques identiques appelées phytomère : le phytomère est constitué d'une feuille, d'un nœud portant un bourgeon axillaire et d'un entrenœud développé en dessous du nœud. Pour une tige donnée, les phytomères sont émis successivement par le méristème apical, zone de division et de différenciation cellulaire située à la pointe de la tige. Au niveau de chaque méristème apical, une inflorescence finale est initiée, mettant fin à l'émission de phytomères végétatifs : c'est une croissance de type déterminé. Les tiges se terminent donc par un organe fructifère qui, dans le cas du sorgho, est une panicule. Les panicules portent les graines. Au niveau des entrenœuds les plus basaux, partent les racines.

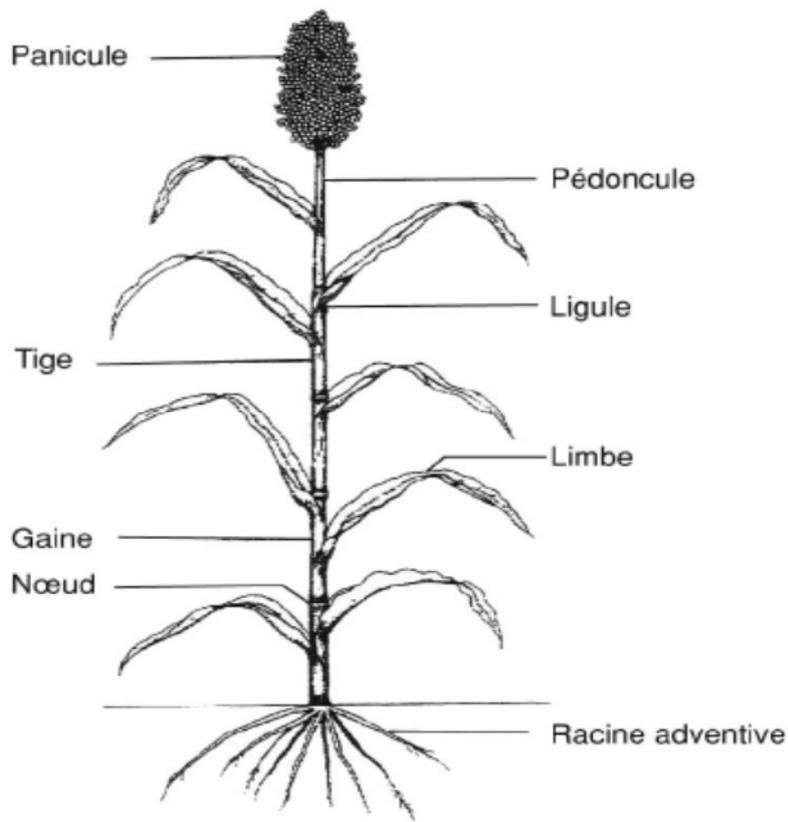


Figure 1: Schémas d'un plan de sorgho arrivé à maturité (d'après Clerget, 2004).

1.4.1 Organes végétatifs

L'essentiel de cette section est largement tiré des travaux de House (1987) et de ceux de Chantereau et Nicou (1991), qui ont décrit clairement et succinctement les différents organes du sorgho.

1.4.1.1 Racines

Le sorgho possède un système racinaire puissant, capable de descendre rapidement à une grande profondeur du sol pour y extraire l'eau et les éléments minéraux. Cette particularité explique en partie les qualités de rusticité et de résistance à la sécheresse observées chez les sorghos (Chantereau et Nicou, 2002). Schématiquement, on reconnaît des racines adventives qui prennent naissance au niveau du collet et s'enfoncent profondément dans la terre jusqu'à deux mètres. Les ramifications qu'elles émettent donnent les racines latérales qui assurent l'exploration du sol dans toutes les directions. Il existe des différences variétales importantes en matière de volume ou de taux de croissance du système racinaire.

1.4.1.2 Tige

La plante de sorgho comprend une tige principale accompagnée de talles issues du développement de bourgeons adventifs situés à la base du brin maître. Le nombre de talles par plante varie en fonction des caractéristiques variétales et des conditions de culture : il est très élevé chez les sorghos sauvages et fourragers (environ une dizaine de talles par plante), moyen chez les sorghos tropicaux de race *guinea* et généralement faible, voire nul, chez les hybrides sélectionnés, notamment quand ils sont semés à forte densité. Selon Mathieu (2005), la hauteur de la plante de sorgho dépend du nombre de nœuds émis (donc de la durée du cycle végétatif) et de la taille des entre-nœuds (sous contrôle génique). La hauteur de la plante à maturité peut varier de 50 cm à 5m. La grosseur des tiges varie également, avec un diamètre basal pouvant aller de 5 mm à 4 cm. Les tiges ont généralement une croissance érigée. Les tissus internes sont secs ou juteux, insipides ou sucrés. Sur les entre-nœuds de la base des tiges peuvent se développer des racines qui aident à l'ancrage des plantes.

1.4.1.3 Pédoncule

C'est l'entre-nœud supérieur qui porte l'inflorescence. Sa croissance est indépendante des autres parties de la tige. Il est droit sauf chez les sorghos de la race *durra* où l'on voit souvent des écotypes à pédoncule croisé. En raison de caractères variétaux ou de l'influence du milieu (sécheresse notamment), on observe parfois des sorghos avec un pédoncule court dégageant mal l'inflorescence de la dernière gaine foliaire. On parle alors de mauvaise exertion.

1.4.1.4 Feuilles

En fonction des cultivars et de leur situation, le nombre de feuilles portées par tige varie de quelques unités à plus de trente. Les feuilles sont constituées d'un faux limbe se terminant en pointe et d'une gaine qui entoure longuement la tige. A maturité le faux limbe peut avoir une longueur allant de 30 cm à 135 cm et une largeur allant de 1,5 cm à 13 cm au point le plus large. Le bord des feuilles peut être droit ou ondulé. Chez les jeunes plants, il est tranchant, ce qui permet de distinguer précocement le sorgho du maïs. Selon Dehaynin (2007), la nervure centrale des feuilles est de couleur blanche ou jaune chez les sorghos à tige sèche, alors que chez les sorghos juteux, la coloration est verte avec souvent une fine bande centrale blanche. Enfin, il existe des sorghos à nervure brune liée à une mutation de la lignine, qui améliore la valeur fourragère des pailles. Sous l'action d'attaques fongiques, d'insectes ou de blessures, des tâches se manifestent sur les feuilles. Si ces tâches sont de couleur rouge, elles caractérisent un

sorgho de type « anthocyané ». Si elles sont de couleur jaune, elles désignent un sorgho de type « tan ».

1.4.2 Organes reproducteurs

1.4.2.1 Panicule

L'inflorescence, chez le sorgho, est une panicule. Elle est constituée d'un axe central, le rachis, d'où partent des branches primaires souvent groupées en verticille le long du rachis. Ces ramifications primaires portent des ramifications secondaires qui, à leur tour, peuvent donner des ramifications tertiaires. La ramification ultime est un racème qui porte une paire d'épillets, l'un sessile et fertile, l'autre pédicellé et stérile. Seul l'épillet sessile terminal de chaque racème est différent. Il est accompagné de deux épillets pédicellés. L'importance relative des différentes parties constitutives de la panicule contribue à la reconnaissance des formes raciales. Ainsi, les sorghos des races bicolor et *guinea* ont des ramifications primaires et un rachis de grande taille, à l'exception des sorghos à balai au rachis très court et aux branches primaires très longues. Chez les sorghos des autres races, les ramifications et le rachis sont moins longs. Ces raccourcissements sont importants chez les sorghos *durra* dont les branches primaires sont souvent tire-bouchonnées.

L'épillet sessile comporte deux fleurs mais sauf cas particulier (sorgho à grains double), seule la fleur supérieure est complète. Il ne produit donc, normalement, qu'une graine. Les épillets sessiles peuvent être aristés. Chaque fleur complète comprend deux stigmates et trois étamines. Le nombre d'épillets fertiles par panicule est variable. On en compte habituellement de 2000 à 4000.

1.4.2.2 Grain

La graine de sorgho est un caryopse composé de trois parties principales : l'enveloppe qui constitue le péricarpe, le tissu de réserve ou albumen et l'embryon. L'épaisseur du péricarpe varie selon les cultivars. Elle joue un rôle dans le décorticage des grains. Entre le péricarpe et l'albumen peut s'insérer une couche hautement pigmentée, la couche brune encore appelée testa. Dans certains génotypes de sorgho, le testa est parfois partiel, pas bien visible ou même absent tandis que dans d'autres, il est fortement pigmenté (Evers *et al.*, 2002 cité par Ba, 2009). Sa présence, déterminée génétiquement, confère une coloration aux préparations culinaires et leur donne une certaine amertume (Chantereau et Nicou, 1991 ; Mathieu, 2005).

L'albumen du sorgho présente à l'extérieur une couche périphérique de cellules riches en vitamines, protéines, et huile : la couche d'aleurone. Sous cette première assise cellulaire se trouve l'albumen corné, vitreux, caractérisé par l'existence de granules d'amidon pris dans une matrice protéique dense. Viens ensuite l'albumen interne, farineux, où les granules d'amidon sont insérés dans une matrice protéique peu importante avec de nombreuses lacunes. L'albumen est normalement blanc. Il existe cependant des sorghos à albumen jaune. Cette particularité leur vient d'une haute teneur en pigments caroténoïdes qui améliore la qualité nutritive des grains.

La couleur du grain de sorgho est une caractéristique variétale due à plusieurs facteurs génétiques. Elle peut aller du blanc au brun très foncé en passant par le jaune, l'orangé, le rouge. Globalement, plus la couleur du grain est claire et plus sa teneur en tanins est faible et sa valeur nutritive bonne. La valeur nutritionnelle du sorgho, est limitée par la faible teneur du grain en trois acides aminés essentiels, la lysine, la méthionine et la thréonine (Balole, 2006). On évalue souvent le poids du caryopse avec des échantillons de mille graines. Il rend compte à la fois de données culturales et variétales de la plante.

1.5 Cycle de développement du sorgho

Le développement d'une plante correspond à la succession des étapes qualitatives qui se produisent durant sa vie du semis à la récolte. Selon Belliard (1982), le cycle de développement des plantes photopériodiques comme le sorgho peut être divisé en 3 grandes phases comprises entre les 4 événements physiologiques majeurs que sont la levée, l'initiation paniculaire (IP), la floraison et la maturité (figure 2) :

- ✚ la phase végétative, période comprise entre la levée et l'initiation paniculaire, comporte deux sous phases physiologiques distinctes :
 - ✓ la sous-phase juvénile qui concerne les premiers jours du développement. La photopériode régnante pendant cette phase n'a pas d'influence sur la durée de la période végétative (Ellis *et al.*, 1997 ; Alagarswamy *et al.*, 1998). La durée de la sous-phase juvénile est variable au sein de l'espèce mais elle est fixe pour une variété. Cette phase correspond à une période pendant laquelle la jeune plante n'est pas apte à fleurir quelles que soient les conditions extérieures inductrices ou non de la floraison ;
 - ✓ la sous-phase d'attente pendant laquelle la plante reste à l'état végétatif si les conditions ne sont pas favorables à la floraison (photopériode trop longue pour les

plantes de jours courts), mais pourrait initier la panicule dans le cas contraire. Cette sous-phase est inexistante chez les plantes insensibles et, pour les plantes photopériodiques, sa durée peut varier de quelques jours à plusieurs mois en fonction de la date de semis.

La durée minimale de la phase végétative (BVP pour Basic Vegetative Phase) est constituée de l'addition de la phase juvénile et de la durée minimale observée de la phase d'attente, tandis que la période restante jusqu'à l'initiation paniculaire est appelée phase induite par la photopériode.

- ✚ la phase de reproduction débute à l'induction florale. Le méristème apical végétatif qui produisait les feuilles se transforme alors en méristème floral et forme la panicule comme on peut l'observer dans la figure3 ci-dessous. Cette phase dure en moyenne de 20 à 30 jours ;
- ✚ la phase de floraison et maturation des graines correspond à l'apparition de l'inflorescence jusqu'à la maturation des grains. Sitôt la pollinisation opérée, le grain commence son développement pour atteindre sa maturité physiologique en passant par les stades laiteux et pâteux. Cette phase dure en moyenne de 30 à 40 jours.

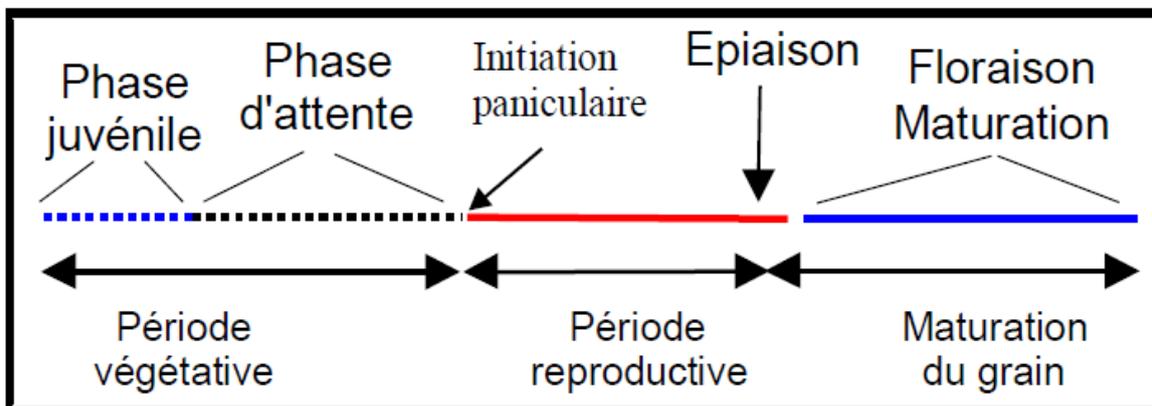


Figure 2: Cycle de développement des céréales (d'après Belliard, 1982).

1.6 Qualités nutritionnelles et toxicité du sorgho

1.6.1 Qualités nutritionnelles

Pour ses principaux constituants biochimiques, le grain sorgho a une composition comparable à celle des autres céréales nues : 84 % de glucides, 3,5 % de lipides, 11 % de protéines et 1,2 % de matières minérales (Fliedel *et al.*, 2004). Pour les glucides, le sorgho a une teneur en amidon voisine de celle du mil (60 à 65 % de matière sèche). La teneur en lipides est voisine de 3,5 % de matière sèche et légèrement inférieure à celle du mil ou du maïs (4 à 4,5 % de matière sèche), mais supérieure à celle du riz cargo (2,5 % de matière sèche). La teneur en protéines, voisine de 11 %, est équivalente à celle du maïs mais cette teneur peut changer en fonction des variétés et des conditions environnementales ou culturales. Sur le plan qualitatif, les protéines du sorgho sont déficientes en lysine comme c'est le cas pour la plupart des céréales. Le sorgho est une céréale sans gluten, facilement tolérée par les patients atteints de la maladie coéliqua. Les éléments minéraux majoritaires du sorgho sont le phosphore et le potassium comme pour les autres céréales. Ces éléments minéraux sont, pour la plupart, concentrés dans les couches périphériques du grain et dans le germe, et sont donc, en grande partie, éliminés lors du décorticage. Comme pour les autres céréales, le grain de sorgho décortiqué est pauvre en vitamines. En alimentation animale, la présence de tannins dans certaines variétés de sorgho a un effet négatif sur la digestibilité des protéines et des hydrates de carbone et réduit la biodisponibilité des acides aminés (FAO, 1995). Ces molécules sont des polymères de polyphénols, à caractère hydrophile, de masse supérieure ou égale à 500 daltons. Il n'y en a pas dans les parties végétatives de la plante. Elles n'ont rien de spécifique au sorgho, mais le sont plus largement au règne végétal. Mais les sorghos avec tannins sont parfois préférés pour la production de bières locales colorées. Au cours des dernières décennies, la recherche agronomique et les organismes agricoles ont réussi à sélectionner et à diffuser des variétés sans tannins utilisables en alimentation animale.

Pour la paille du sorgho, une étude réalisée par Kaboré-Zoungrana (1995) sur la composition chimique de quelques sous-produits agricoles et sous-produits agro-industriels, fait ressortir des faibles teneurs en matière azotée totale pour les pailles, qui en revanche sont riches en parois cellulaires. Les pailles ont une ingestibilité faible. Distribuées à des ovins sur la base de 70 g/kg p^{0,75}, les taux de refus ont été plus élevés avec la paille de sorgho (44,4 %) qu'avec le riz (21,5 %). Cette faible ingestibilité s'accompagne d'une digestibilité réduite de la matière sèche, expliquant qu'il soit souvent difficile de les distribuer comme seul aliment de la ration.

1.6.2 Toxicité du sorgho

Les sorghos font partis d'un groupe très vaste de plantes, dites cyanogénétiques, qui synthétisent, pendant une période de leur développement, un hétéroside porteur d'un groupement cyanyl (-CN). L'hydrolyse de ces molécules, par l'action d'une glucosidase, libère de l'acide cyanhydrique (HCN), connu comme l'un des produits les plus toxiques qui soient (Rickard, 1976 ; Nouza, 1984). Il existe plusieurs dizaines d'hétérosides cyanogénétiques différents. L'hétéroside du sorgho est propre à cette plante : il s'agit de la durrhine. Le grain de sorgho est exempt de substances toxiques. Seules la tige et les feuilles de certaines espèces renferment dans certaines conditions de la durrhine qui fait du sorgho un fourrage éventuellement toxique voire mortel pour les animaux. L'âge de la plante est le facteur le plus important. Pour tous les végétaux cyanogénétiques et le sorgho en particulier, le potentiel cyanhydrique passe par un maximum puis diminue avec l'âge à partir d'un certain stade, variable selon les espèces. Chez les sorghos, ce stade se situe aux environs du 40^e jour, pour une taille de 40 cm environ. Puis le taux de durrhine diminue jusqu'à la pleine épisaison pour se stabiliser ensuite à un niveau minimum (Piedallu, 1923). Les taux les plus élevés se rencontrent dans les parties de la plante en croissance (jeunes plants, jeunes feuilles, rejets, partie supérieure de la plante), sur les sols riches en azote, durant les périodes de photosynthèse intense ainsi qu'en cas de faible pluviosité. La plante âgée, à partir de la floraison et de l'épisaison, n'est plus toxique (Gremy, 2006 ; Halkier et Moller, 1989). Le fourrage ou l'ensilage qui sont normalement réalisés avec des plantes vigoureuses, ne contiennent plus de durrhine.

1.7 Sorgho au Sénégal

Les céréales constituent l'aliment de base des populations sénégalaises aussi bien dans les campagnes que dans les villes. Selon les statistiques de la FAO, les modèles de consommation dans le Sahel sont à base de céréales. Celles-ci apportent par exemple au Sénégal environ 65% des calories et 61 % des protéines. Ceci leur confère une importance particulière du point de vue économique et politique. Pour la campagne agricole 2017/2018, la production nationale céréalière était estimée à 2 545 494 tonnes sur 1 704 718 ha (ANSD, 2018). Le sorgho n'a représenté que 225 865 tonnes sur 221 329 ha derrière respectivement le mil, le maïs et le riz. La culture du sorgho présente un rendement moyen de 874 kg.ha⁻¹ ces cinq dernières années (2013-2017 ; ANSD, 2018). Cette faible production peut s'expliquer par un déficit presque permanent en intrants agricoles, plus particulièrement en semences améliorées et de qualité, et en engrais, et par des difficultés liées aux techniques culturales, ennemis (moisissures, insectes,

oiseaux...), périodes de sécheresse, médiocre fertilité des sols, et au contexte socioéconomique (Ndiaye *et al.*, 2005).

1.7.1 Distribution géographique et système de culture

Le sorgho est cultivé partout au Sénégal à des degrés divers et constitue avec le mil la base de l'alimentation des populations (Luce, 1985). C'est une culture traditionnelle pratiquée en système pluvial, mais aussi en système de décrue et irrigué dans la vallée du fleuve Sénégal. Les principales zones de production sont par ordre d'importance la Haute Casamance, le Sénégal Oriental, la région de Kaolack et la région de Thiès. En pluvial, le sorgho est principalement cultivé dans les zones de climat Soudano-Sahélien entre les isohyètes 400 et 1200 mm. Au Sénégal (figure 3), la culture du sorgho pluvial est ainsi essentiellement pratiquée dans le Centre-Sud et le Sud (Moyenne et haute Casamance). Dans le Centre-Nord et le Sine-Saloum le sorgho est concurrencé par le mil précoce. Il n'occupe que les bas-fonds où les sols sont argileux (sols deck). En basse Casamance il n'est qu'une céréale secondaire après le riz et le maïs. Dans la vallée du fleuve Sénégal, le sorgho est surtout produit en culture de décrue et en culture irriguée d'hivernage dans les périmètres aménagés (Ndiaye *et al.*, 2005). La vaste plaine alluviale, en moyenne vallée du fleuve Sénégal, représente le domaine de prédilection du sorgho de décrue. Cette plaine s'étend sur plus de 400 kilomètres, de l'aval de Bakel à Richard-Toll sur 10 à 25 km de large, et couvre plus de 800 000 hectares (Le Roy *et al.*, 2005).

La culture de sorgho de décrue est pratiquée de novembre à avril (Cissé, 2001), dans les terres exondées, encore gorgées d'eau par leur submersion prolongée en saison des pluies. Avec l'arrêt des pluies, le phénomène de l'évaporation est accentué. L'eau baisse alors dans le fleuve, et la décrue est amorcée. Les terres sont libérées très rapidement, et deviennent accessibles au bout de 5 à 10 jours (Watt, 1986). Il faut alors semer très vite, afin de profiter au maximum de l'humidité au début de la végétation des cultures, qui doivent boucler leur cycle avant le souffle chaud et sec de l'harmattan. La plante se développe sans pluie, puisant, grâce à son système racinaire profond, l'eau emmagasinée dans le sol. Selon Chantereau et Nicou (1991), les variétés appartiennent en général à la race *durra* et comprennent quatre grands types : les « samba souki », les « pourdi », les « sevil » et les « diaknate ». Des rendements de l'ordre de 350 à 400 kg/ha sont courants en année normale. Pour la culture irriguée, au terme de plusieurs années d'expérimentation dans les casiers aménagés des principales vallées pluviales du sahel, elle est maintenant bien maîtrisée.

Dans la vallée du fleuve Sénégal, ce sont les sols « fondé » qui se prêtent le mieux à la culture irriguée du sorgho (Chantereau et Nicou, 1991). D'une façon générale, les variétés locales ne répondent que très peu aux compléments d'irrigation pour la production de grains. Le sorgho représenté par du matériel sélectionné type hybride (Américain ou obtention IRAT) ou type lignée pure précoce IRAT 204, à taille courte (1 à 2 m) est bien adapté aux conditions de la culture irriguée. Des possibilités réelles pour la culture irriguée de sorgho existent dans le département de Podor.

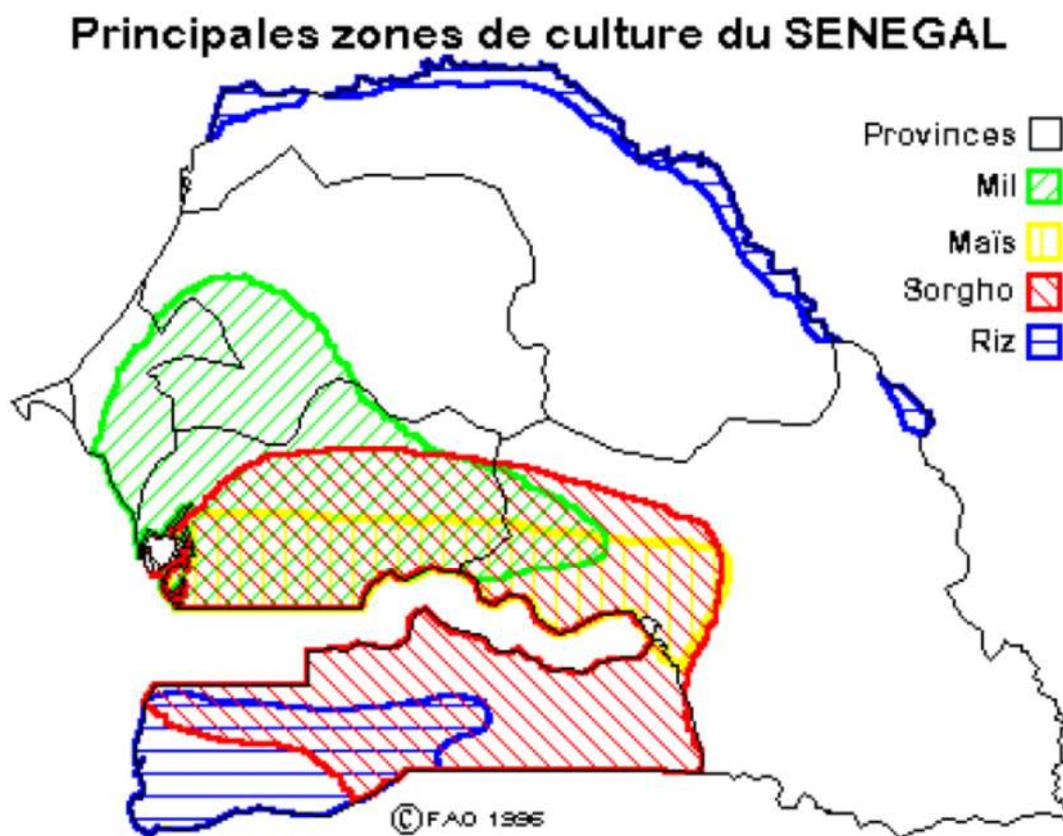


Figure 3: Carte montrant les principales zones de culture des cultures pluviales au Sénégal, dont celles du sorgho (en rouge) (source FAO, 1995).

1.7.2 Amélioration variétale du sorgho au Sénégal

L'essentiel de cette partie est basé sur le rapport de Luce (1988), qui rend compte des activités de recherche de l'ISRA sur le sorgho de 1950 à 1986 mais aussi des travaux de Trouche (1993) et de Cissé (2001). Le programme sorgho comporte deux composantes : amélioration variétale et phytotechnie. L'amélioration variétale du sorgho comporte le volet obtention de lignées pures par la méthode de sélection généalogique et le volet obtention d'hybrides par l'exploitation de

l'hétérosis et de la stérilité mâle cytoplasmique. Les recherches ont pris en compte les types de culture (culture de décrue, cultures irriguées d'hivernage et de contre-saison froide, et culture pluviale) et les différences de pluviométrie existant entre les régions.

1.7.2.1 Objectifs de l'amélioration variétale

Le sorgho est étudié au Sénégal depuis les années 1950. Jusqu'en 1960 un seul sélectionneur chargé des mils et sorghos a surtout porté son attention sur le sorgho (Mauboussin *et al.*, 1977). Avant 1960, l'objectif était de coller aux habitudes des populations locales en leur proposant des sorghos phénotypiquement semblables, plus productifs et à meilleure qualité de grains si possible. Entre 1960 et 1965, le sorgho a fait l'objet d'une sélection plus intensive. Mais les objectifs, encore assez vagues, étaient une amélioration générale du rendement et l'obtention de sorghos assez voisins de ceux utilisés par les paysans au point de vue port et cycle. A partir de 1965-1966, l'amélioration des techniques culturales, l'introduction de matériel non originaire d'Afrique de l'Ouest, la définition d'objectifs précis par région, l'appoint d'une section de diversification sur le fleuve Sénégal, allaient permettre des progrès plus rapides (Mauboussin *et al.*, 1977). Selon Luce 1988, les nouveaux objectifs de sélection fixés après 1965, dans le but d'intensifier la culture de sorgho sont les suivants :

- ✚ taille courte (2 m max. pour les sorghos pluviaux et environ 1.5 m pour les sorghos irrigués) de façon à augmenter les densités sans favoriser la verse ;
- ✚ précocité : cycle court de 90 à 100 jours pour le Centre Nord et Nord (pluviométrie inférieure à 800 mm) de 110 à 120 jours pour le Centre Sud et Sud du Sénégal (pluviométrie supérieure à 800 mm) ;
- ✚ panicule semi-compacte, dressée et à bonne exsertion (*caudatum*) ;
- ✚ grain clair, sans couche brune (absence de tanin) et à bonne vitrosité ;
- ✚ productivité et adaptation aux conditions locales.

Dans un troisième temps, d'autres objectifs ont été rajoutés :

- ✚ bonne vigueur à la levée et stabilité des rendements pour les lignées ;
- ✚ augmentation de la gamme de précocité pour les hybrides.

1.7.2.2 Acquis de l'amélioration variétale

L'amélioration variétale du sorgho présente des acquis largement exploitables dans toutes les zones climatiques du Sénégal grâce à la fourchette des cycles oscillant entre 85 et 120 jours (Luce, 1985). La plupart des acquis obéit aux objectifs de précocité, de taille courte, productivité et bonne qualité de graine (couleur claire, sans couche brune, vitrosité moyenne).

Le choix du matériel végétal a été essentiellement guidé par la diversité des systèmes de culture et des types de culture (pluvial, irriguée ou de décrue).

Pour le sorgho de décrue, on dispose d'un certain nombre de variétés locales améliorées de type *durra*. Les rendements peuvent aller jusqu'à 1500 Kg.ha⁻¹ avec une densité de 10 000 plantes.ha⁻¹.

En culture irriguée, la sélection porte sur des lignées et des hybrides précoces adaptés à chacune des deux saisons de culture irriguées, hivernage et contre-saison froide, des périmètres irrigués de la vallée du fleuve Sénégal. Il s'agit de variétés lignées, comme CE151-262 pour la culture hivernale et 75-14 pour la contre-saison froide (Trouche, 1992). Des hybrides ont été aussi proposés mais n'ont pas fait l'objet d'une production spécifique au Sénégal. Leur cycle total est de 85 à 90 jours ; cette précocité permet d'économiser les irrigations. Leur productivité peut dépasser alors 4000 Kg.ha⁻¹.

Enfin pour la culture pluviale essentiellement, des lignées ont été proposées à la vulgarisation, car les hybrides sont mal acceptés par les paysans (Luce, 1985). On dispose des *guinea* constitués essentiellement de variétés locales peu productives, photosensibles et valorisant mal les techniques d'intensification (Ndiaye *et al.*, 2005) et des *caudatum* qui sont à la base de la plupart des variétés améliorées (CE 145-66 ; CE 180-33 ; CE196-7-2 ; F2-20...) et des *durra*. Certains d'entre eux présentent une bonne rusticité et une bonne tolérance à la sécheresse. A côté de ces variétés, quatre nouvelles variétés, tous des *caudatum*, ont été homologuées récemment et en cours de vulgarisation : 621A (Nginthe), 621B (Faourou), 622A (Nganda) et 622B (Darou).

1.8 Définition d'idéotype variétal

1.8.1 Définition du concept « idéotype »

Le concept « idéotype » a été utilisé par Donald (1968) pour décrire les types de plantes optimaux. Il a défini ainsi les idéotypes comme des « plantes ayant des caractéristiques modèles connues pour influencer la photosynthèse, la croissance et (dans les céréales) le rendement en grains ». Ainsi, Donald a développé ce concept en lien avec les problèmes de compétition inter-plantes. Sa théorie repose sur le fait qu'un idéotype pertinent doit être un faible compétiteur, c'est-à-dire qu'il doit atteindre un rendement faible en condition isolée mais, cultivé en cultures pures à densité agricole, il doit être capable de hauts rendements. Il nécessite un minimum de besoins en ressources par unité de biomasse produite.

Depuis, l'avènement de ce concept, plusieurs définitions ont été utilisées par la suite. C'est ainsi, plus récemment que Debaeke et Quilot-Turion (2014) dans le cadre d'une école chercheurs, ont défini l'idéotype comme la combinaison optimale des caractères morphologiques et physiologiques (traits) ou de leurs déterminants génétiques conférant à un matériel végétal une adéquation satisfaisante à un environnement, à un mode de production et d'utilisation donnés, ce qui permet d'avoir plus de caractères et cibles de sélection. Le Centre National de Ressources Textuelles et Lexicales créé par le CNRS a aussi défini l'idéotype comme un « Modèle nouveau de plante qui, en conditions de culture (communauté de plantes), utilise mieux que les types actuellement connus les ressources du milieu (lumière, eau, éléments minéraux) et en supporte mieux les aléas (adversités climatiques, parasitisme) afin de prouver un meilleur revenu ».

Il est précisé que « un idéotype n'est pas un modèle a priori. Il peut se concevoir et même être remis en question, à la faveur d'observations et d'études physiologiques, génétiques ou agronomiques ». Ainsi, cette nécessité de mettre en relation un idéotype à un environnement donné avait été clairement nommée par Donald. Il identifiait un idéotype de base qui doit être fortement productif dans un environnement hautement favorable ou idéalisé.

1.8.2 Importance de l'idéotypage pour la sélection

Le besoin social et économique reconnu d'augmenter la production mondiale du sorgho avec des ressources terrestres et hydriques limitées, face aux conditions climatiques changeantes et aux systèmes culturaux, nous amène à augmenter considérablement les rendements des cultures. Cette augmentation du rendement passe par des pratiques culturales et la sélection de

génotypes adaptés à chaque environnement. Cette sélection a été traditionnellement assurée par les paysans eux même à travers la sélection massale (Chantereau et Nicou, 1991). C'est seulement depuis l'avènement des découvertes scientifiques sur l'hérédité que les sélectionneurs ont pris le relai en augmentant considérablement les rendements par des techniques conventionnelles d'amélioration des plantes en rapport aux autres disciplines relatives à l'agronomie. En effet, ces techniques conventionnelles d'amélioration des cultures mettent l'accent sur la sélection pour le rendement en soi ou l'amélioration des génotypes en incorporant la résistance aux maladies, la résistance aux insectes, la résistance à la verse, etc. sans tenir compte du pourquoi ce rendement est supérieur (Frey, 1970). En plus, 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 dans quels environnements.

Cette réponse différente d'un génotype dans différents environnements est connue sous le nom d'interaction génotype-environnement (G x E) et rend difficile la tâche du sélectionneur pendant la phase d'évaluation des génotypes ainsi créés. Ceci rend peu reproductible l'observation d'un rendement moyen et l'estimation d'un rendement devient peu précise à condition d'avoir recours à des essais multi-environnements et pluri-annuels. Ainsi, le choix par observation directe entre des génotypes donnés devient difficile. Pour contourner ces problèmes, Frey (1970) a suggéré une approche alternative moins empirique pour améliorer le rendement. Sa proposition impliquait le développement de types de plantes idéales par l'optimisation des composants du rendement et de traits morphologiques et (ou) physiologiques selon les environnements. Cette méthode de création d'un génotype sur la base des traits souhaitables en fonction des connaissances de l'environnement et de la plante rejoint la définition de Donald (1968) pour la conception d'un idéotype.

Ainsi, la sélection par idéotype peut potentiellement améliorer l'efficacité de la sélection conventionnelle. En effet, Donald (1962) a identifié l'importance des connaissances de base sur les processus conduisant à la production de matière sèche et à la formation d'un rendement économique. Cela a conduit à une approche de sélection axée sur la conception (Donald 1968). Il a fait valoir que les chances de trouver un type de plante fortement amélioré dans la sélection conventionnelle sans une conception claire seraient faibles. Par conséquent, en identifiant les caractères responsables du rendement élevé dans des conditions de culture réelles pouvant être mesurés avec précision et au début du processus de sélection, l'obteneur est en mesure de

sélectionner plus tôt le rendement et donc d'être plus efficace pour l'améliorer (Gauffreteau, 2018).

Cette approche de sélection est d'autant plus utile dans le contexte de sélection actuel avec un nombre croissant d'objectifs de sélection qui peuvent être mal reliés les uns aux autres et parfois être antagonistes. En plus, les sélectionneurs gagneront à aller plus loin et à spécifier l'objectif ou le phénotype souhaité pour chaque caractère. L'établissement d'objectifs et la génération d'hypothèses dans les programmes de sélection sont presque certainement bénéfiques (Rasmusson, 1991). La sélection d'idéotypes constitue un bon moyen de considérer les gènes/caractères de matériel génétique d'élites importantes pour les progrès futurs. En effet, la sélection pour un idéotype de trait fournit un moyen de transférer la diversité génétique de collections non améliorées qui pourraient sinon rester inexploitées en ce qui concerne les gènes de productivité. En plus, le potentiel de rendement peut être amélioré en modifiant génétiquement des caractéristiques morphologiques, physiologiques et phénologiques. Une fois que cela est accepté, le défi consiste à trouver quels traits modifiés et le phénotype ou l'expression optimum pour ces traits (Rasmusson, 1991).

1.8.3 Rôle de la modélisation dans l'idéotypage variétale

La conception des idéotypes de culture devrait alors être basée sur la compréhension physiologique globale du système et sur son interaction avec les facteurs édaphiques, climatiques, biotiques et de gestion. Une telle compréhension devrait faciliter la prédiction des effets de différentes combinaisons de traits physiologiques/morphologiques dans différents environnements. En effet, un idéotype étant une combinaison de caractères cibles pour atteindre les objectifs de sélection principaux, il faut examiner attentivement la corrélation entre les traits cibles possibles. Dans la littérature, l'identification des caractères cibles possibles et leur combinaison en idéotypes sont appuyées par des essais sur le terrain et des modèles de culture.

Les essais consistent généralement à tester des génotypes contrastés bien décrits pour leur phénotype dans des environnements cibles et à identifier des caractères d'intérêt pour atteindre un objectif particulier (Polania *et al.*, 2017, Hammami *et al.*, 2017). Ces approches «réelles» basées sur des variétés et un environnement existants sont utiles pour combler les lacunes dans les connaissances et confirmer certaines hypothèses sur les caractères d'intérêt possibles. Cependant, ils nécessitent généralement une caractérisation phénotypique coûteuse et sont limités par le nombre de conditions environnementales étudiées. C'est probablement pour cette raison que le nombre de ce type d'étude reste assez limité dans la littérature sur les idéotypes.

Avec l'avancement de la modélisation écophysiological des cultures au cours des dernières décennies, le potentiel d'intégrer les connaissances des processus physiologiques et morphologiques pour concevoir de nouveaux types de plantes est apparu. Ainsi, les approches de modélisation informatique des cultures sont plus fréquentes, en particulier dans la littérature récente (Qi *et al.*, 2010; Casadebaig et Debaeke, 2011; Suriharn *et al.*, 2011; Kadrani *et al.*, 2012; Quilot-Turion *et al.*, 2012; Semenov et Stratonovitch, 2013). Les modèles de culture sont une représentation simplifiée d'un système, issue d'un certain point de vue et orientée par une certaine finalité (Jeuffroy *et al.*, 2008). Ils sont constitués d'un ensemble de relations mathématiques décrivant le fonctionnement du système sol-plante en interaction avec le climat et les opérations techniques. Pour ces raisons, les modèles de culture sont aussi appelés modèles biophysiques ou encore modèles biotechniques. Les équations mathématiques, appelées formalismes, sont constituées de variables d'état, qui caractérisent l'état du système à différents pas de temps, et de paramètres, qui définissent l'intensité des relations entre les variables d'état du système (Jones et Luyten, 1998 ; Wallach, 2006a).

Une classification des modèles de culture existe en fonction du nombre de cultures prises en charge et des choix de formalismes opérés lors de l'élaboration du modèle de culture. Les modèles spécifiques ont été développés pour la représentation de la croissance et du développement d'une culture donnée, généralement dans l'objectif de répondre à une question précise alors que, les modèles génériques se caractérisent par la description quantitative des processus biologiques qui sont communs à plusieurs cultures. Ils traitent la spécificité de chaque espèce au travers d'options de simulation et de différentes valeurs des paramètres (Wang et Engel, 2002). Ces modèles sont des outils efficaces pour rassembler et formaliser différents types de connaissances (expertes ou scientifiques) dans divers domaines (écophysiology, génétique, pathologie, agronomie, etc.).

Combinés à de puissants algorithmes d'optimisation (Sambakhé, 2018), ces modèles peuvent aider à mettre en évidence les caractères et la combinaison de caractères permettant d'atteindre certains objectifs. Ils peuvent donc être très utiles pour définir des idéotypes ou identifier des génotypes adaptés à des conditions de culture particulières. Martre *et al.* (2015), Rotter *et al.* (2015) et Jeuffroy *et al.* (2014) ont donné plus de détails sur la manière dont les modèles peuvent soutenir la conception des idéotypes et leurs recommandations. Ces modèles informatiques sont très intéressants pour explorer une combinaison révolutionnaire de caractères ou de conditions de culture et par conséquent pour prédire le comportement de génotypes totalement nouveaux dans des environnements de culture futurs.

Chapitre 2 : Interaction génotype-environnement : compromis entre performances agronomiques, et stabilité de génotypes de sorgho (*Sorghum bicolor* L. Moench) double usage au Sénégal

Ce chapitre a fait l'objet de publications. Un article déjà publié est reproduit en annexe.

Article de journal

Malick Ndiaye, Myriam Adam, Bertrand Muller, Aliou Guissé et Ndiaga Cissé, 2018. **Performances agronomiques et stabilité phénotypique de génotypes de Sorgho (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) au Sénégal : une étude des interactions génotypes-environnement.** Journal of Applied Biosciences. <https://dx.doi.org/10.4314/jab.v125i1.10>

Article en finalisation de rédaction

Malick Ndiaye, Myriam Adam, Bertrand Muller, Aliou Guissé et Ndiaga Cissé. **Interaction génotype-environnement : compromis entre performances agronomiques, et stabilité de génotypes de sorgho (*Sorghum bicolor* L. Moench) double usage au Sénégal.** En cours de soumission dans Cahiers d'Agriculture.

2.1 Résumé

La création et/ou l'introduction de nouveaux génotypes de sorghos (*Sorghum bicolor* L. Moench) adaptés à divers environnements est confrontée à la présence d'interaction génotype x environnements significative qui en réduit l'efficacité. Pour analyser de manière approfondie les interactions génotypes et environnements et évaluer les compromis entre performances agronomiques et stabilité des rendements en grains et biomasses pailles du sorgho dans les conditions soudano-sahéliennes, des essais en blocs complets randomisés avec quatre répétitions ont été conduits à Bambey (2013), Sinthiou Malem (2013 à 2016) et Nioro du Rip (2015). Dix (10) génotypes de sorgho contrastés ont été utilisés. Les résultats montrent que (1) le modèle AMMI a révélé un effet hautement significatif ($P < 0,0001$) des génotypes, environnements et interaction génotype-environnement et la plupart des génotypes ont montré des adaptations spécifiques, (2) les meilleures productions ont été obtenues pour le grain avec Nieleni et Fadda et pour la biomasse pailles avec IS15401 et SK5912, (3) les génotypes Grinkan et SK5912 pour le grain et Soumba pour la biomasse se sont révélés comme des génotypes ayant de faibles performances mais avec une bonne stabilité phénotypique, (4) les génotypes 621B, F2-20, Fadda et CSM63E ont montré pour la production de grains des adaptations spécifiques respectivement aux environnements S16D1, S14D1, S15D2 et N15D1 caractérisés entre autres par une fertilité globale relativement bonne (S16D1 et S14D1), une bonne pluviométrie (N15D1) ou alors une faible fertilité et une absence de maladie (S15D2). Pour la biomasse paille IS15401 et SK5912 se sont montrés spécifiquement adaptés respectivement aux environnements S14D1 et B13D1 caractérisés par une fertilité globale relativement bonne et pour B13D1 une certaine pression de maladies, (5) pour l'aptitude à la double production les génotypes Nieleni et Fadda se sont distingués du lot dans la majorité des environnements et dans une moindre mesure la même aptitude pour les génotypes Pablo et IS15401 et que la précocité du semis est avantageux à la double production, (6) le génotype 621B témoin sénégalais a présenté une sensibilité particulière aux conditions de culture (sol) mais reste très productif (plus de 3 tonne à l'hectare) dans de bonnes conditions agro-pédologiques (en S16D1). Ces résultats nous conduisent à recommander les variétés Fadda et Nieleni pour nos régions d'étude.

Mots clés : Rendements grains, biomasse paille, génotypes, interaction génotype-environnement, stabilité, AMMI, sorghos.

2.2 Introduction

Le sorgho (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) est une des principales céréales cultivées dans les régions tropicales arides et semi-arides (Djè *et al.*, 2007). Considéré comme une plante des régions chaudes, 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). Il 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 et le maïs, la troisième céréale pluviale cultivée avec une superficie totale estimée à plus de 221 329 ha pour une production nationale de 225 865 tonnes et un rendement moyen de 1020 Kg.ha⁻¹ (ANSD, 2018). 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).

Parmi les actions en faveur de la sécurité alimentaire au Sénégal, 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 à la sélection de génotypes 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 de génotypes et pour prédire les réponses phénotypiques aux changements environnementaux. Cependant, en général les méthodes de caractérisation de stabilité statistique ne sont pas en

mesure de fournir un modèle de réponse précis et complet pour cette interaction (Holts, 1995), car la réponse génotypique à la variation environnementale est multi-variée et alors que la plupart des indices de stabilité a une réponse uni-variée (Crossa, 1990). Ainsi, 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 (*Additive Main effect and Multiplicative Interaction*) 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 étudie les principaux effets des génotypes et des environnements et la PCA porte ensuite sur la partie non additive du modèle représentant l'interaction (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 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). Par conséquent, avec cette technique, on peut facilement identifier des génotypes productifs avec une grande adaptabilité et identifier aussi des méga-environnements, ainsi que délimiter le zonage agronomique des génotypes avec une adaptabilité spécifique et donc par suite pouvoir identifier les environnements dans lesquels effectuer des tests (Kempton, 1984 ; Gauch et Zobel, 1996 ; Ferreira *et al.*, 2006).

Cette présente étude a pour objectif (1) d'analyser les interactions génotypes et environnements et l'adaptabilité et stabilité de 10 génotypes de sorgho dans plusieurs environnements au Sénégal au cours de 4 années en utilisant la méthode AMMI et (2) d'identifier les génotypes performants en termes de rendement grain et/ou biomasse paille, ou les deux à la fois (aptitude au double usage).

2.3 Matériel et méthodes

2.3.1 Site expérimentaux

Les expérimentations ont été menées lors des saisons des pluies 2013, 2014, 2015 et 2016 en trois stations de recherche de l'Institut Sénégalais de Recherches Agricoles (ISRA), à savoir les stations de Sinthiou Malem (en 2013, 2014, 2015, 2016), Bambey (en 2013) et Nioro du Rip (en 2015). Les caractéristiques des différents sites sont données dans le tableau 1 et la figure 4 présente les évolutions des pluviométries et des températures des trois zones 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 pluviométries varient fortement d'une année à l'autre. Les sols dominants sont des sols sableux ayant une très faible capacité de rétention en eau de 80 à 100 mm.m⁻¹ (Vachaud *et al.*, 1978 ; Hamon, 1980 ; Imbernon, 1981). Les stations de Nioro du Rip et Sinthiou Malem se situent à l'interface entre les zones sahéliennes et soudaniennes. Elles bénéficient d'une saison des pluies de 4 à 5 mois qui est plus arrosée qu'à Bambey, mais qui reste toujours marquée par une variabilité interannuelle forte. Les sols restent à dominance sableuse mais présentent des taux d'argile et de limons légèrement plus élevés et des capacités de rétention en eau allant de 90 à 120 mm.m⁻¹ (Hamon, 1978 ; Baret, 1980 ; Valet, 1984).

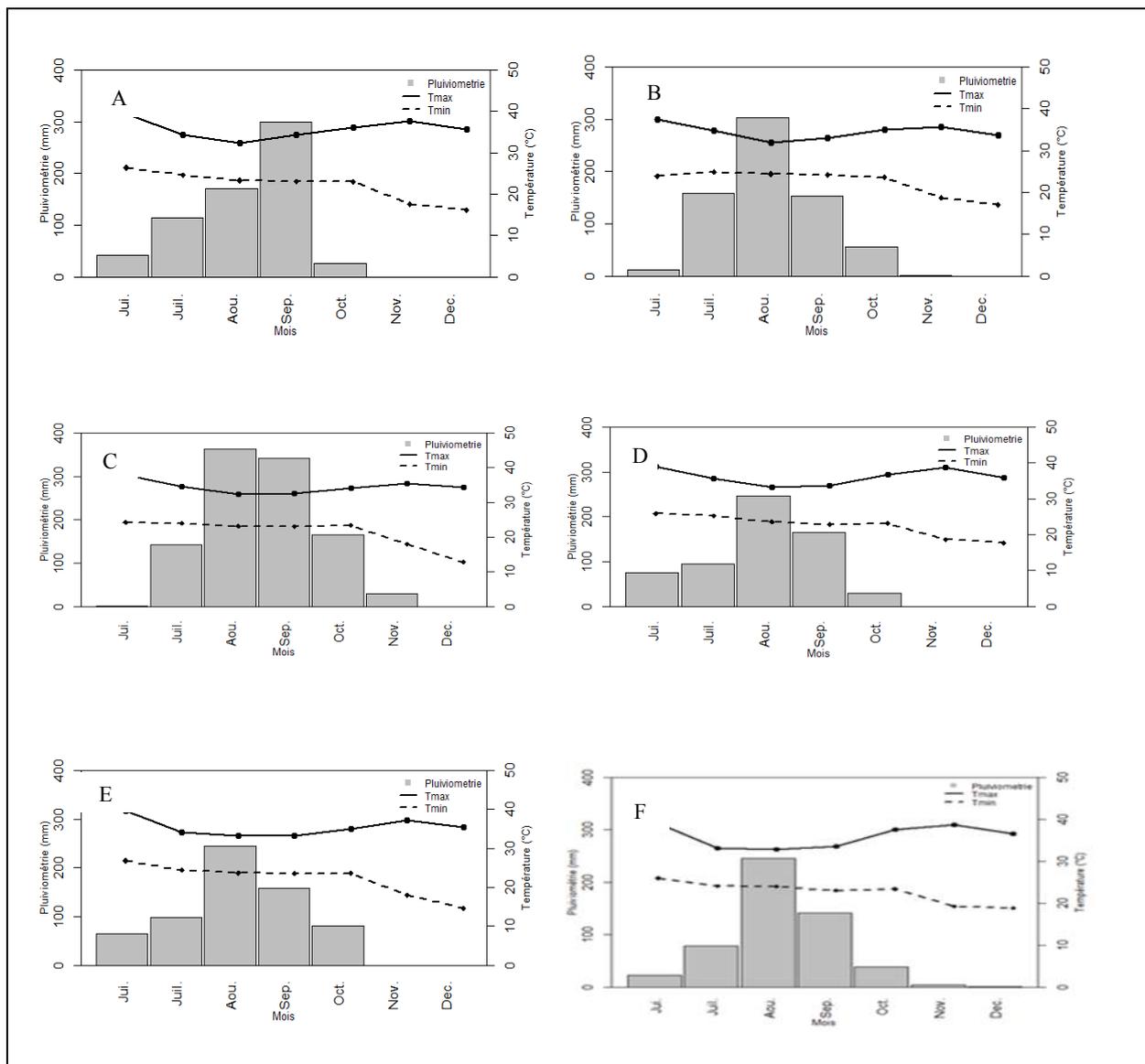
2.3.2 Matériel végétal

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 les 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 dans le tableau 2.

2.3.3 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 (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⁻¹. Le démariage s'est effectué à un plant, en condition humide, avant le tallage

(environ 15^{ème} jour après semis. 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⁻¹ au semis ou à la levée, et deux apports d’urée (46% N) à la dose de 50 Kg.ha⁻¹, juste après le démariage pour le premier puis à la montaison pour le second. Des sarclo-binages, 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.



Jui.=Juin, Juil= Juillet, Aou= Août, Sep.=Septembre, Oct. =Octobre, Nov. = Novembre, Dec. = Décembre

Figure 4: Pluviométries et températures minimales et maximales des zones d’étude Bambeï 2013 (A), Nioro du Rip 2015 (B) et Sinthiou Malem 2013 (C), 2014 (D), 2015 (E) et 2016 (F).

Tableau 1: Caractéristiques des différents sites d'essais.

Environnement	Zone	Code	Position	Alt (m)	Type sol*	SAB (%)	AL (%)	N (%)	MO (%)	Pluie (mm)	P ₀₋₃₀ (mm)	P ₃₀₋₆₀ (mm)	P ₆₀₋₉₀ (mm)	P ₉₀₋₁₂₀ (mm)	Tmin (°C)	Tmax (°C)	**Sain	Date semis	Précédant cultural
Semis 1/ 2013	BBY	B13D1	14°42'N 16°29'W	20	Sableux	94,2	6,6	0,15	3,1	644	180	352	110	3	23	33,9	2	17/07/2013	Jachère
Semis 2/2013	BBY	B13D2			Sableux	94,2	6,6	0,15	3,1	566	253	256	56	1	22,8	33,9	3	31/07/2013	Jachère
Semis 1/ 2013	SIN	S13D1		23	Sablo-limoneux	89,4	11,6	0,21	4,3	575	146	365	59	6	21,4	35,3	5	25/07/2013	Jachère
Semis 2/ 2013	SIN	S13D2			Sablo-limoneux	89,4	11,6	0,21	4,3	536	183	306	46	1	21,2	35,4	5	06/08/2013	Jachère
Semis 1/ 2014	SIN	S14D1			Sableux	91,2	10,2	0,17	5,7	488	158	213	88	31	22,2	35,7	4	17/07/2014	Arachide
Semis 2/ 2014	SIN	S14D2			13°49' N 13°55' W	Sableux	90,9	9,7	0,17	4,5	377	190	156	31	1	22,1	35,6	5	06/08/2014
Semis 1/ 2015	SIN	S15D1			Sableux	93,7	6,3	0,32	3,5	505	52	259	153	43	21,8	34,7	2	09/07/2015	Arachide
Semis 2/2015	SIN	S15D2			Sableux	93,2	6,8	0,33	3,8	455	259	155	44	2	21,2	34,9	4	08/08/2015	Arachide
Semis 1/ 2016	SIN	S16D1			Sablo-limoneux	84,1	15,9	0,55	10,6	447	230	155	24	38	22,5	35,6	5	25/07/2016	Jachère
Semis 1/ 2015	NIO	N15D1			13°45' N 15°45' W	45	Sableux	92,4	7,6	0,31	3,5	943	196	361	261	126	20,6	33,8	3
Semis 2/ 2015	NIO	N15D2	Sablo-limoneux	87,0			13,0	0,43	6,1	747	329	273	145	0	19,7	33,8	4	13/08/2015	Jachère

BBY= Bambey ; SIN=Sinthiou Malem ; NIO=Nioro du Rip ; Alt=Altitude ; SAB= Sable, AL=Argile + Limon. * Classification selon la méthode USDA faite sur les données moyennes sur l'horizon 0 - 30cm ; P₀₋₃₀=cumul de pluie entre 0 et 30 jours après semis. P₃₀₋₆₀= cumul de pluie entre 30 et 60 jours après semis ; P₆₀₋₉₀= cumul de pluie entre 60 et 90 jours après semis. P₉₀₋₁₂₀= cumul de pluie entre 90 et 120 jours après semis ; ** = note attribuée à un environnement donné selon le niveau de maladies : la situation favorable prend la note 5 (absence de maladie) et la situation défavorable la note 1 (présence forte de maladies). Pluie= cumul de pluie durant l'essai.

Tableau 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>Caudatum (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</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

2.3.4 Dispositif expérimental et variables mesurées

Tous les essais ont été conduits selon un même dispositif en blocs complets randomisés avec quatre répétitions (les randomisations étaient différentes d'un essai à l'autre). Les parcelles élémentaires comprenaient 7 lignes de 40 poquets, pour une superficie de 44,8 m² (5,6 m x 8 m), avec en leur centre une placette de 21 poquets (3 lignes x 7 poquets ; 3,36 m²) 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⁻¹.

2.3.5 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 » (11 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 également fixe selon le modèle statistique suivant :

$$Y_{ijk} = \mu + G_i + E_j + B_k(E_j) + (GE)_{ij} + \varepsilon_{ijk} \quad (\text{Eq 2.1})$$

Où Y_{ijk} est le rendement du génotype i dans l'environnement j et le bloc k , μ 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 ε_{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, les analyses d'adaptabilité et de stabilité phénotypique ont été effectuées par la méthode AMMI comme décrit dans Zobel et al. (1988) en utilisant le modèle statistique suivant :

$$Y_{ij} = \mu + g_i + e_j + \sum_{k=1}^n \lambda_k \alpha_{ik} \gamma_{jk} + r_{ij} + \varepsilon_{ij} \quad (\text{Eq 2.2})$$

Où Y_{ij} est la réponse moyenne du génotype i dans l'environnement j ; μ est la moyenne globale ; g_i est l'effet fixe du génotype i ($i = 1, 2, \dots, g$) ; e_j est l'effet fixe de l'environnement j ($j = 1, 2, \dots, n$).

... e) ; ε_{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, λ_k est la valeur propre de l'axe k , α_{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 l'analyse de la variance (ANOVA) chaque axe correspondant à un modèle AMMI. Généralement, lorsque les interactions $G \times E$ sont significatives, les modèles AMMI avec un ou deux axes principaux (respectivement modèles $AMMI_1$ et $AMMI_2$) 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 $AMMI_2$, les génotypes, qui ont de faibles scores sur l' $IPCA_1$ (premier axe de l'analyse en composante principale de l'interaction) ou l' $IPCA_2$ (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.

Pour l'identification des génotypes montrant le meilleur compromis entre la production de grains et de biomasse paille (aptitude double usage), un scatterplot a été réalisé où les performances des génotypes ont été comparées à la performance moyenne des dix génotypes sur l'ensemble des environnements via l'indice I_{AP} décrit ci-dessous :

$$I_{AP} = \frac{RDT_{ij} - \overline{RDT}}{\overline{RDT}} \quad (\text{Eq 2.3})$$

Où I_{AP} = indice d'aptitude d'un génotype i donné à la production de grain (ou de biomasse paille) pour un environnement j donné ; RDT_{ij} = Rendement en grain (ou en biomasse) d'un génotype i donné pour un environnement j donné ; \overline{RDT} = Rendement moyen global en grains

(ou en biomasse paille) de tous les génotypes sur tous les environnements. Ainsi, pour un environnement j donné, un I_{AP} positif ($I_{AP} > 0$) d'un génotype i pour le grain ou la biomasse paille indique une bonne aptitude de ce génotype i pour la production de grains ou pour celle de biomasse paille pour cet environnement j , et inversement si l' I_{AP} d'un génotype i est négatif pour le grain ou pour la biomasse paille. Des I_{AP} positifs (ou négatifs) pour un génotype i donné à la fois pour le grain et la biomasse paille indiqueront donc une bonne (ou mauvaise) aptitude à la double production (grain et biomasse paille) pour ce génotype i pour cet environnement j donné. Toutes les analyses statistiques ont été effectuées en utilisant le logiciel R version 3.2 (R Development Core Team, 2015).

2.4 Résultats

2.4.1 Caractéristiques des environnements

Les environnements ont été caractérisés par des indicateurs quantitatifs et qualitatifs portant sur la fertilité du sol, la répartition de la pluviométrie durant le cycle de culture et la présence globale de maladies (chloroses et nécroses de plants causant des hétérogénéités) (Tableau 1). Les valeurs des indicateurs pour chaque environnement ont été synthétisées à travers une analyse en composantes principales : celle-ci montre que 68,7 % de l'information initiale renseignée est restituée (figure 5), avec son axe PC1 fortement corrélé à la fertilité et à la présence de maladies et l'axe PC2 corrélé à la pluviométrie. Les environnements étudiés ont pu être classés en six groupes selon les combinaisons des sous-dimensions des deux axes PC1 et PC2 :

- ✚ groupe 1 : environnements caractérisés par une très bonne fertilité du sol, une absence de maladie et une faible pluie globale mais bien répartie. S16D1 occupe seul ce groupe ;
- ✚ groupe 2 : environnements avec une fertilité du sol relativement bonne et une quasi absence de maladie dans un environnement climatique très humide, mais faible en fin de cycle. L'environnement N15D2 appartient seul à ce groupe ;
- ✚ groupe 3 : formé d'environnements très humides durant tout le cycle, une faible fertilité du sol et une présence de maladies à un niveau moyen. N15D1 occupe seul ce groupe ;
- ✚ groupe 4 : environnements caractérisés par un cumul pluviométrique globalement satisfaisant, une fin de pluie précoce, une fertilité du sol relativement bonne et une absence de maladie. On retrouve dans ce groupe les environnements S13D1, S13D2, S14D1 ;

- ✚ groupe 5 : regroupe des environnements présentant de nombreuses contraintes (et où les performances génotypiques sont les plus faibles) : très faible fertilité du sol, présence importante de maladies et une faible pluviométrie en fin de cycle. Les environnements B13D1, B13D2 et S15D1 appartiennent à ce groupe ;
- ✚ groupe 6 : il est caractérisé par une fertilité globale du sol moyenne à faible, une faible pluviométrie globale durant le cycle, un faible cumul de pluie en fin cycle et une présence de maladies à un niveau moindre. On retrouve dans ce groupe les environnements S14D2 et S15D2.

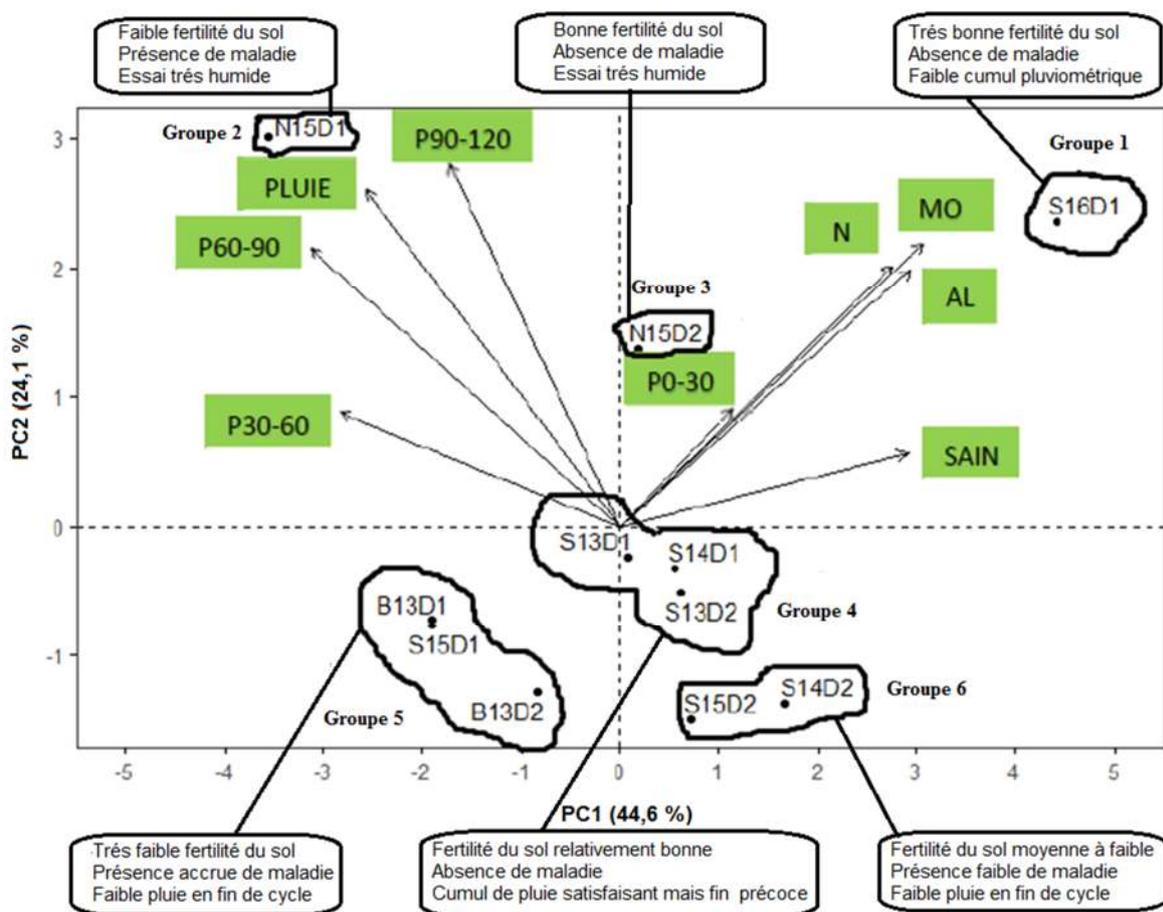


Figure 5: Analyse en composantes principales (PCA) des caractéristiques des environnements étudiés.

Les environnements et indicateurs sont explicités dans le tableau 1.

2.4.2 Effets des génotypes, environnements et interactions 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 biomasse paille ($p < 0,001$). Le rendement moyen en grains des génotypes (Figure 6) a varié de 2018 $\text{Kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ (Nieleni) à 807 $\text{Kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ (SK5912). Les génotypes ont montré des performances inconstantes dans tous les environnements sauf Fadda et Nieleni qui ont été relativement meilleurs dans tous les environnements (Figure 6). Trois génotypes ont obtenu un rendement moyen supérieur à la moyenne générale (1454 $\text{Kg}\cdot\text{ha}^{-1}$), à savoir Nieleni, Fadda et Pablo, avec des rendements respectifs de 2018 $\text{Kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, 1833 $\text{Kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ et 1615 $\text{Kg}\cdot\text{ha}^{-1}$. Parmi ces génotypes, Nieleni et Fadda ont montré des rendements élevés pour les différents environnements. Les trois génotypes les moins performants ont été F2-20, Grinkan et SK5912 avec des rendements grains moyens respectifs de 1333 $\text{Kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, 1281 $\text{Kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ et 807 $\text{Kg}\cdot\text{ha}^{-1}$. En outre, le rendement moyen en grain des environnements (Figure 6) a varié de 530 $\text{Kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ (B13D2) à 2313 $\text{Kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ (S16D1). Six environnements sur les onze ont eu des rendements moyens supérieurs à la moyenne générale : S16D1 (2313 $\text{Kg}\cdot\text{ha}^{-1}$), N15D2 (1766 $\text{Kg}\cdot\text{ha}^{-1}$), S13D1 (1714 $\text{Kg}\cdot\text{ha}^{-1}$), S14D1 (1696 $\text{Kg}\cdot\text{ha}^{-1}$), N15D1 (1610 $\text{Kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) et S13D2 (1570 $\text{Kg}\cdot\text{ha}^{-1}$).

Au niveau de la biomasse paille (Figure 7), les rendements moyens des génotypes ont varié de 10478 $\text{Kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ (IS15401) à 4384 $\text{Kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ (621B). Les génotypes ont montré des performances inconstantes dans tous les environnements sauf IS15401 et SK5912 qui étaient relativement meilleurs dans tous les environnements (figure 7). Trois des dix génotypes ont obtenu des rendements moyens au-dessus de la moyenne générale (6952 $\text{Kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) à savoir IS15401, SK5912 et Fadda, avec des valeurs respectives de 10478 $\text{Kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, 10171 $\text{Kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ et 7812 $\text{Kg}\cdot\text{ha}^{-1}$. Parmi eux SK5912 et IS15401 ont obtenu des rendements élevés pour plusieurs environnements. Le rendement moyen en biomasse paille des environnements (Figure 7) a varié entre 9536 $\text{Kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ (B13D2) et 4923 $\text{Kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ (S15D2). Cinq environnements ont des rendements supérieurs à la moyenne générale, en l'occurrence B13D2, S14D1, B13D1, S16D1 et N15D1 avec des rendements respectifs de 9533 $\text{Kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, 9015 $\text{Kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, 8055 $\text{Kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, 7852 $\text{Kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ et 7660 $\text{Kg}\cdot\text{ha}^{-1}$. Les valeurs moyennes des rendements moyens (moyenne des répétitions) en grains et biomasse paille ($\text{Kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) de chacun des dix génotypes sur chacun des onze environnements étudiés sont présentées en annexes 2 et 3.

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

Source de variation	Grains (Kg.ha ⁻¹)			Biomasses (Kg.ha ⁻¹)		
	DL	Carré Moyen	Variance expliquée (%)	DL	Carré Moyen	Variance expliquée (%)
Génotype (G)	9	3990633***	17,9	9	178164830***	36,7
Environnement (E)	10	7936033***	39,6	10	92439498***	21,2
Blocs (E)	33	523880***	8,6	33	17553265***	13,3
Interaction (G x E)	89	759922***	33,8	89	14146802***	28,8
IPCA ₁	18	1371515***	36,6	18	32487030***	52
IPCA ₂	16	1117060***	26,5	16	17004129***	24,2
IPCA ₃	14	1011953***	21	14	10009335*	12,5
IPCA ₄	12	396066	7	12	4671580	5
IPCA ₅	10	386334	5,7	10	3398772	3
Erreur	289	231846		287	4711029	

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

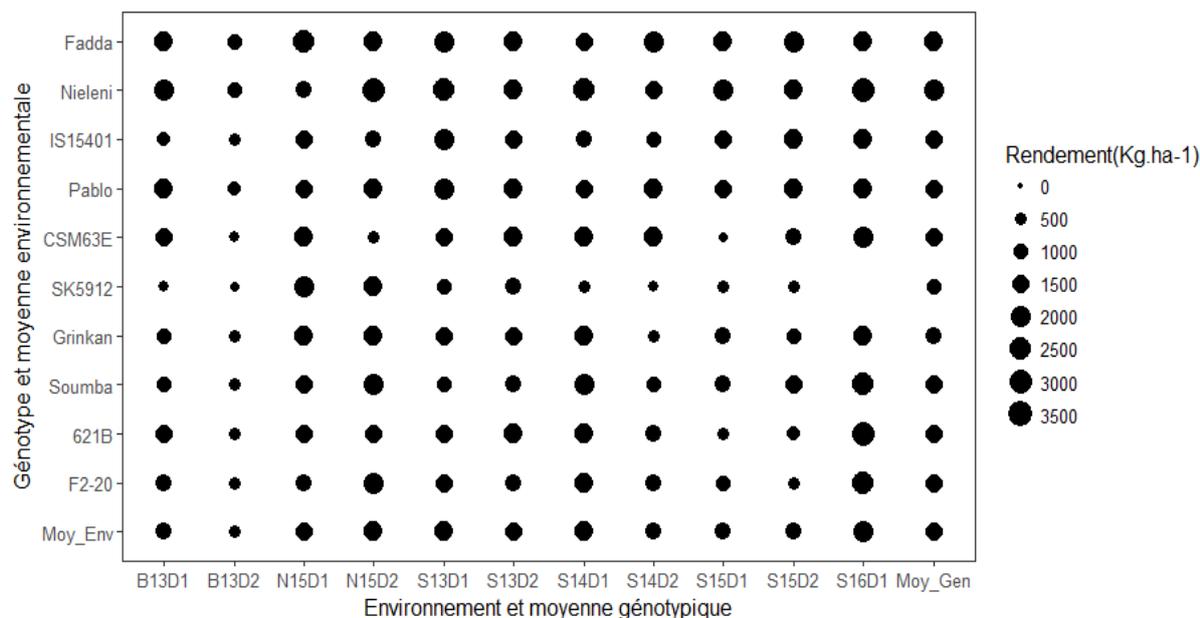


Figure 6: Rendement moyen (moyenne des répétitions) en grains (Kg.ha⁻¹) de chacun des dix génotypes sur chacun des onze environnements étudiés et valeurs des moyennes génotypiques, environnementales et générales.

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, S15D1= date semis 1 Sinthiou Malem, S15D2= date semis 2 Sinthiou Malem, S16D1= date semis 1 Sinthiou Malem, N15D1= date semis 1 Nioro du Rip, N15D2= date semis 2 Nioro Rip. Les chiffres 13, 14, 15 et 16 correspondent aux années 2013, 2014, 2015 et 2016. Moy_Gen= moyenne génotypique, Moy_Env = moyenne environnementale.

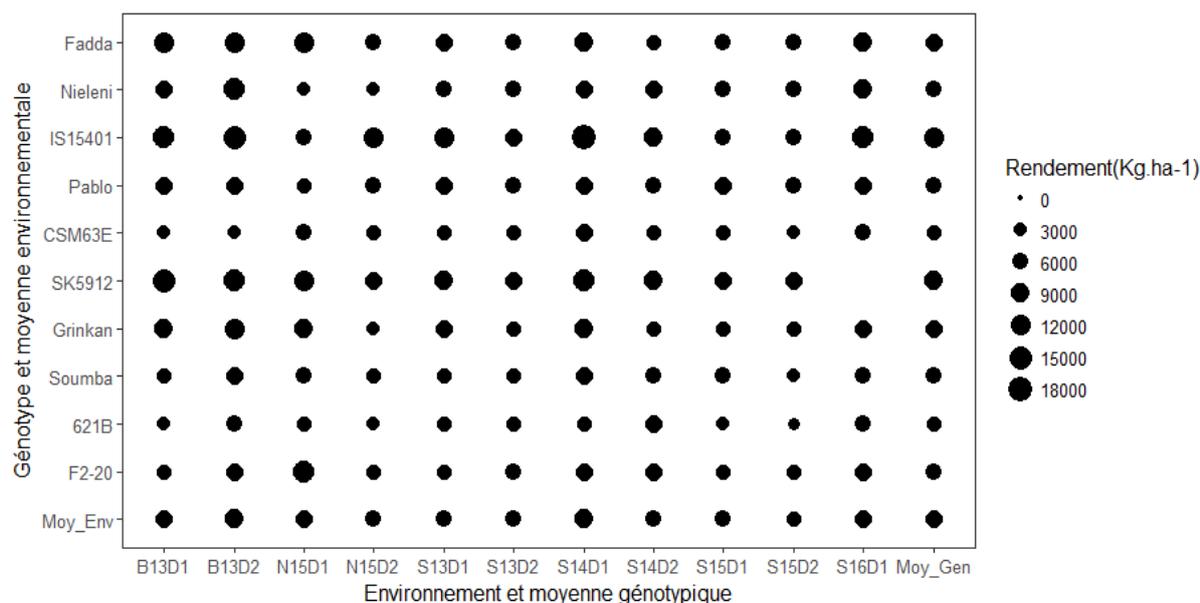


Figure 7: Rendement moyen (moyenne des répétitions) en biomasses paille (Kg.ha⁻¹) de chacun des dix génotypes sur chacun des onze environnements étudiés et valeurs des moyennes génotypiques, environnementales et générales.

2.4.3 Analyse AMMI de l'interaction génotype-environnement (G x E)

L'analyse AMMI de la variance à travers les onze environnements a montré pour le rendement grains que 17,9 %, 39,6 % et 33,8 % 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 biomasse paille, une grande partie de la variabilité observée (36,7 %) a été attribuée aux génotypes et seulement 21,2 % et 28,8 % 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 60,3 % et 76,2 % de la somme des carrés des écarts pour le rendement grain et le rendement biomasse paille (IPCA₁ et IPCA₂). 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.

2.4.4 Quel(s) géotype(s) pour quel(s) environnement(s) ?

Le graphe biplot AMMI₂ montre que pour le rendement grain les environnements S16D1, N15D1 et N15D2, du fait de leurs scores élevés, ont le mieux discriminé les performances des différents géotypes évalués, et ont été une source significative de contribution à l'interaction (figure 8). Cependant leurs moyennes ont été parmi les plus élevées, ce qui indique que ce sont des environnements favorables pour obtenir des moyennes élevées. La principale raison de ces rendements élevés dans ces environnements cités est la fertilité globale relativement élevée du sol (S16D1 ; groupe 1 dans la caractérisation des environnements ; cf. figure 5), ou une bonne pluviométrie associée à une fertilité globale du sol relativement bonne (cas de N15D1 et N15D2 qui appartiennent respectivement aux groupes 2 et 3). De même, les environnements S15D1, S15D2 et S14D2 ont été « discriminants », mais en présentant des rendements inférieurs à la moyenne globale. Ils se caractérisent entre autres par une faible fertilité du sol, une présence de maladie accrue (S15D1), et une faible pluviométrie en fin de cycle (S14D2). A l'inverse B13D2 a contribué nettement moins à l'interaction et a été le principal facteur contribuant à la stabilité phénotypique de ces géotypes (figure 8). Cet environnement a enregistré l'un des plus bas rendements moyens en grain car il était très contraignant en termes de maladies, fertilité du sol et pluviométrie en fin de cycle.

De par leur position le long des deux axes (scores proches de zéro), Grinkan et SK5912 ont été les plus stables, mais en présentant les rendements les plus faibles. Par contre, les géotypes 621B, Soumba, F2-20, IS15401 et CSM63E, tous présentant des rendements inférieurs à la moyenne générale, se sont montrés très instables du fait de leurs positions très éloignées de l'origine. Enfin les géotypes Fadda, Nieleni et Pablo se sont révélés également instables, mais en présentant des rendements élevés en grain. Les géotypes et les environnements proches des uns des autres dans le biplot ont des associations positives, ce qui facilite certainement l'identification d'une adaptation spécifique. Ainsi, le géotype 621B et Nieleni ont eu des adaptations spécifiques respectivement aux environnements S16D1 et N15D2. Il en est de même pour Soumba et F2-20 vis-à-vis de l'environnement S14D1, de IS15401, Pablo et Fadda pour S15D2, et enfin de CSM63E pour l'environnement N15D1 (figure 8).

En ce qui concerne le rendement en biomasse paille, les environnements B13D1, B13D2, S14D1 et N15D1, tous avec des rendements supérieurs à la moyenne globale, ont contribué de manière significative à l'interaction comme l'indiquent leurs positions très éloignées de l'origine. Ces environnements ont été caractérisés par des dates de semis normales avec une

fertilité naturelle du sol relativement bonne (S14D1) et une longue saison très pluvieuse et bien répartie (N15D1) favorable à la production de biomasse (à noter que le stress de fin cycle en B13D2 n'a pas affecté la production de biomasse). Les environnements S13D2 et S15D1, très rapprochés sur le biplot (figure 9), ont influencé les génotypes de la même manière, avec tous des rendements en biomasse paille inférieurs à la moyenne globale. Ces environnements ont été caractérisés par une fin de saison précoce (S13D2) et une faible fertilité globale du sol et la présence de maladie (S15D1) affectant la production de biomasse paille. En revanche, S13D1, S16D1 et N15D2 ont nettement moins contribué à l'interaction et ont été les principaux contributeurs à la stabilité phénotypique des génotypes qui ont montré une tendance à se comporter de façon similaire entre eux dans chacun de ces trois environnements (figure 9). De plus ces environnements ont enregistré des niveaux de rendements distincts : supérieur à la moyenne globale pour S16D1, proche de la moyenne globale pour S13D1 et inférieur à la moyenne globale pour N15D2. Il a été noté dans ces environnements une absence de maladie et une fertilité naturelle du sol relativement bonne.

De par leurs positions par rapport à l'origine du biplot, certains génotypes se sont montrés stables (cas de Soumba), ou instables avec des adaptations spécifiques (cas de IS15401, SK5912 et Fadda, F2-20, Nieleni et Pablo). Parmi ces génotypes, IS15401, SK5912 et Fadda ont montré des rendements au-dessus de la moyenne globale. SK5912 et Fadda ont eu une adaptation spécifique à l'environnement B13D1. Il en est de même pour F2-20 vis-à-vis de l'environnement N15D1, d'IS15401 pour S14D1, et de Nieleni et Pablo pour S15D1 et S13D2. Par contre IS15401 et SK5912 se sont révélés très peu adaptés aux environnements S15D1, S15D2, S13D2 et S14D2. Ces quatre environnements qui se sont révélés très contraignants pour ces génotypes sont caractérisés par une faible fertilité (exception faite de S14D2), une pression de maladies accrue (surtout S15D1), des semis tardifs, et une faible pluviométrie en fin de cycle (cas de S14D2).

D'une manière générale, les génotypes Fadda, Nieleni, IS15401, F2-20 et Pablo ont été très instables à la fois pour le grain et la biomasse paille et ont montré des adaptations spécifiques aux environnements de Sinthiou Malem et Nioro du Rip pour le grain, et surtout aux environnements semés en date 1 pour la biomasse paille. Parmi ces génotypes Fadda, Nieleni, IS15401 et Pablo ont été globalement performants à la fois pour le grain et la biomasse paille. Les génotypes Soumba et Grinkan ont été stables à travers les environnements mais peu performants.

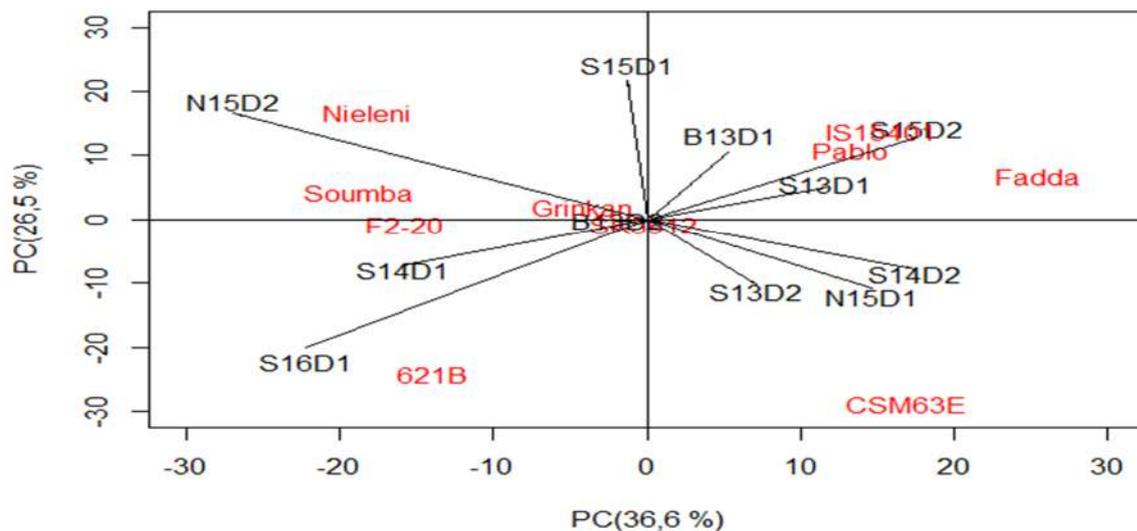


Figure 8: Biplot AMMI des rendements en grains des dix géotypes de sorgho et des onze environnements.

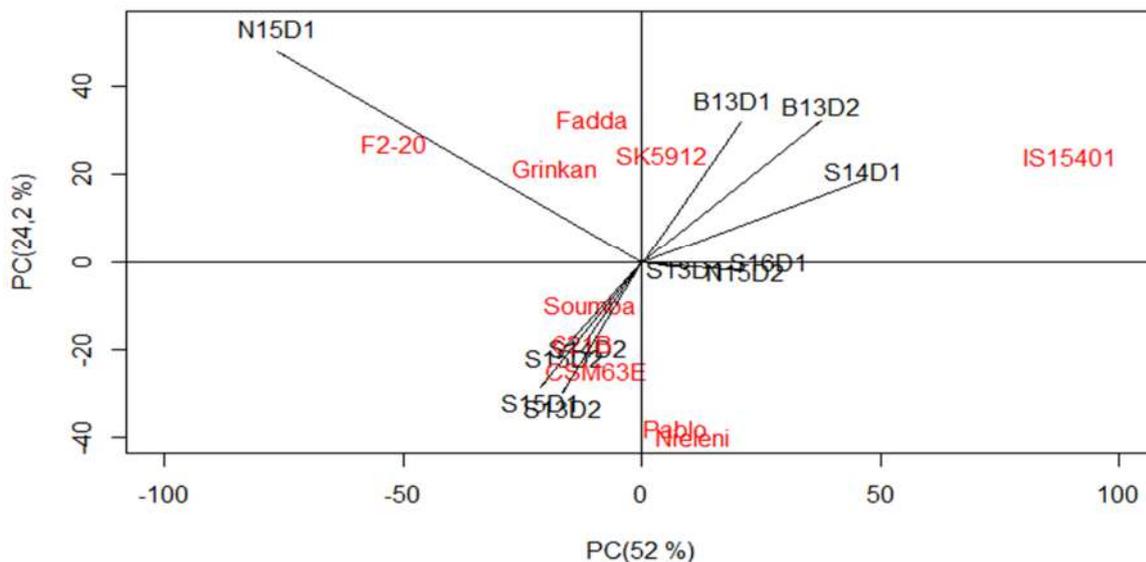


Figure 9: Biplot AMMI des rendements en biomasses paille des dix géotypes de sorgho et des onze environnements.

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, S15D1= date semis 1 Sinthiou Malem, S15D2= date semis 2 Sinthiou Malem, S16D1= date semis 1 Sinthiou Malem, S16D2= date semis 2 Sinthiou Malem, N15D1= date semis 1 Nioro du Rip, N15D2= date semis 2 Nioro Rip

2.4.5 Quel(s) génotype(s) montre(nt) une aptitude au double usage ?

La figure 10 présente, pour chaque génotype, ses indices d'aptitude à la production de grain et de biomasse paille dans les onze environnements d'étude. Indépendamment de l'environnement (en réalité presque indépendamment car l'environnement B13D2 fait exception puisque tous les génotypes y ont de mauvaises productions de grains) cinq génotypes ont présenté systématiquement des résultats performants soit pour le grain (Fadda, Nieleni et Pablo), soit pour la biomasse paille (IS15401 et SK5912), et parmi eux Fadda est celui qui combine les meilleures performances de productions de grains et pailles dans le plus grand nombre d'environnements. Ces génotypes ont tous montré des adaptations performantes pour les productions de grains et/ou biomasse paille, et/ou pour les deux (cas de Fadda) selon l'analyse AMMI (figures 8 et 9). Pour le double usage Fadda est donc bien positionné (dans le quadrant supérieur-droit) dans 5 environnements, Nieleni et Pablo dans 3 environnements, et IS15401 dans 2 environnements. Il est à noter que tous ces environnements où ces génotypes ont exprimé une aptitude au double usage ont été semés aux dates normales (date 1), c'est-à-dire à des dates précoces. Pour le grain Fadda est bien classé (dans les 2 quadrants du haut) dans 10 environnements, Nieleni dans 8, Pablo et CSM63E dans 6, et IS15401 dans 4.

En ce qui concerne la biomasse paille SK5912 a montré de bonnes performances (dans les 2 quadrants droits des figures) dans 9 environnements, IS15401 dans 7, Fadda dans 6 et Nieleni et Pablo dans 4. Nieleni et surtout Fadda ont donc montré la plus stable double production sur l'ensemble des environnements étudiés. A l'opposé SK5912 a été systématiquement bien classé pour la biomasse paille dans 9 environnements (stable pour la biomasse) mais que dans 2 pour le double usage.

D'autres génotypes comme CSM63E, Grinkan, Soumba, 621B et F2-20, qui présentent tous des rendements génotypiques moyens en grains et biomasses inférieurs aux moyennes globales, ont tous montré des doubles mauvaises performances (quadrant inférieur-gauche) dans plusieurs environnements. C'est le cas en particulier de Soumba et 621B dans la moitié des situations. Ils se révèlent stables et peu performants pour la biomasse paille (figure 9) et ne sont jamais apparus comme doublement performants (aptés au double usage) dans aucune des 11 situations. Les environnements où ils ont exprimé des doubles performances ont été pour la plupart semés tardivement (date 2) et appartiennent à des groupes d'environnements affectés par des contraintes auxquelles ces génotypes ont été sensibles : N15D1 pour le groupe 3 ; S13D2

pour le groupe 4 ; B13D1, B13D2 et S15D1 pour le groupe 5 ; et S14D2 et S15D2 pour le groupe 6.

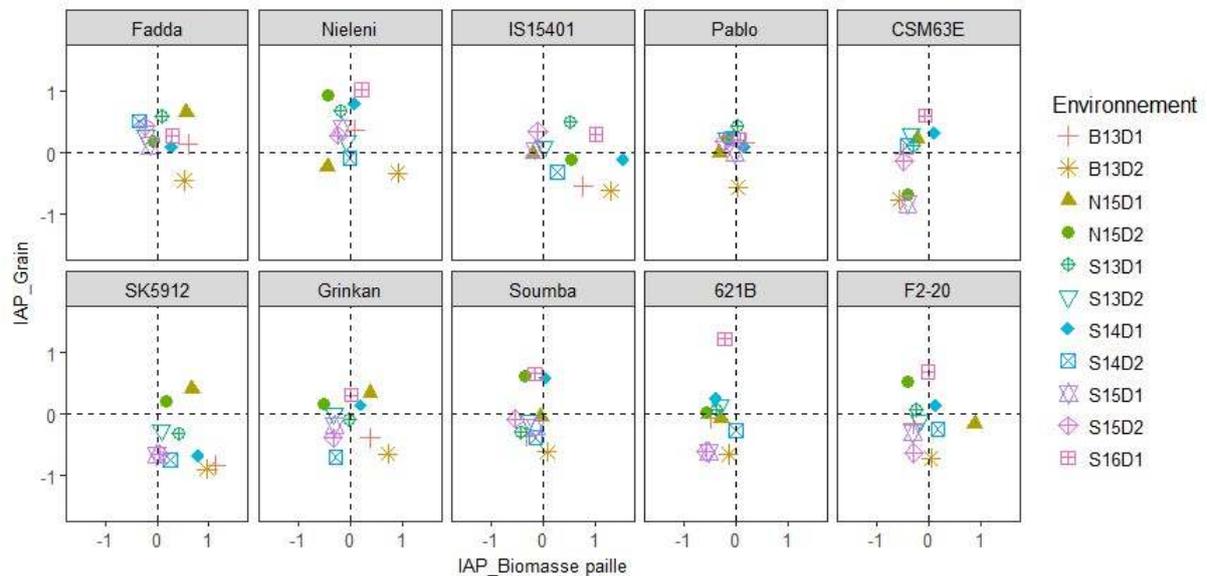


Figure 10: Comparaisons des aptitudes à la double production des dix géotypes sur les onze environnements d'étude via les indices I_{AP} .

Les lignes en pointillés représentent les droites d'équations $x=0$ et $y = 0$.

2.5 Discussions

L'analyse de la variance combinée a révélé des effets significatifs des environnements (plus importants pour le grain), des géotypes (plus importants pour la biomasse paille) et interactions géotype-environnement. Ceci indique que ces géotypes répondent différemment aux environnements, ce qui confirme bien une diversité phénotypique parmi les géotypes évalués. Ces résultats sont du même type que ceux d'Almeida Filho *et al.* (2014), Ndiaye *et al.* (2018) et Showemimo *et al.* (2000) sur le sorgho. Les rendements moyens des dix géotypes ont varié entre 807 Kg.ha^{-1} et 2018 Kg.ha^{-1} pour le grain et entre 4384 Kg.ha^{-1} et 10748 Kg.ha^{-1} pour la biomasse ; et ceux des environnements, entre 530 Kg.ha^{-1} et 2313 Kg.ha^{-1} pour le grain et entre 4923 Kg.ha^{-1} et 9536 Kg.ha^{-1} pour la biomasse (figures 6 et 7). D'une manière générale, les rendements sont plus importants en date de semis 1 qu'en date 2, montrant l'importance potentielle d'une durée de cycle plus longue et l'existence d'une réponse à la photopériode de plusieurs 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 que les autres. A noter que ces 4 génotypes 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.

2.5.1 Quel(s) génotype(s) pour quel(s) environnement(s) ?

Différents modèles multiparamétriques pour mesurer la stabilité de la performance des génotypes à travers des environnements sont disponibles dans la littérature. À l'heure actuelle, le modèle le plus utilisé est AMMI (Raton *et al.*, 1992; Raju, 2002; Zali *et al.*, 2012), qui implique à la fois l'ANOVA et l'analyse en composante principale (PCA) afin de décomposer l'interaction G x E. Dans cette présente étude, deux génotypes (Grinkan et SK5912) pour le grain et deux génotypes pour la biomasse (Soumba et Grinkan) ont été identifiés comme globalement plus stables selon ce modèle et ils ont par ailleurs montré 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. Ils confirment aussi l'affirmation de Yan et Hunt (2002) qui indique 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 621B, F2-20, Fadda et CSM63E ont été proches respectivement des environnements S16D1, S14D1, S15D2 et N15D1 alors que pour la biomasse les génotypes IS15401 et SK5912 ont été proches respectivement des environnements S14D1 et B13D1, ce qui indique des adaptations spécifiques. A l'opposé, IS15401 et SK5912 se sont révélés très peu adaptés aux environnements S15D1, S15D2, S13D2 et S14D2.

L'adaptation spécifique de IS15401 à l'environnement S14D1 pourrait être dû à la fois à la date de semis normale et aux bonnes conditions agro-pédologiques qui ont permis à ce génotype d'enregistrer logiquement de meilleures performances bien qu'il n'ait pas été très arrosé. Pour l'adaptation de SK5912 à B13D1 on pourrait l'expliquer par la date de semis précoce et par le fait que les maladies qui ont affecté les autres génotypes (figure 6) n'ont pas affecté sa production de biomasse. La faible adaptation de IS15401 et SK5912 en S15D1 et S14D2 pour la production de biomasse pourrait être imputée par une faible fertilité et une maladie en S15D1 qui a attaqué ces génotypes mais par le semis tardif et une faible pluviométrie en fin de cycle observée à S14D2.

La possibilité d'identifier des génotypes présentant des performances globalement stables et des génotypes montrant des adaptations spécifiques à certains environnements constitue un avantage important de la méthode AMMI comparativement aux autres méthodes couramment employées (Silva Filho *et al.*, 2008).

2.5.2 Choix de génotypes ayant une bonne aptitude au double usage

La sélection des génotypes montrant un bon compromis entre la production de grains et celle de biomasses paille, basée sur la comparaison avec les performances moyennes des dix génotypes sur l'ensemble des environnements, a révélé que les génotypes les plus aptes au double usage étaient les hybrides Fadda, en premier lieu, et Nieleni, suivis de Pablo puis de IS15401 qui est relativement instable à la fois pour le grain et la biomasse paille et donc à adaptation spécifique. Fadda et Nieleni ont été identifiés comme particulièrement aptes au double usage dans respectivement 5 et 3 environnements alors que Pablo et IS15401 l'ont été dans 2 environnements chacun (figure 10). De plus, Nieleni n'est apparu comme mauvais producteur de grains ou de biomasses que dans respectivement 3 et 6 environnements, et Fadda ne l'a été lui que dans respectivement 1 et 5 environnements. A l'opposé Soumba et 621B ont montré de mauvaises productions de grains et biomasses dans la moitié des environnements.

La supériorité des trois hybrides (Fadda, Nieleni et Pablo) pour l'aptitude au double usage découle probablement de leur nature génétique car ce sont des sorghos *guinea* de grande taille (Fadda et Pablo) et *caudatum* (Nieleni) sélectionnés pour la production de grain, sachant que l'on sait par ailleurs que d'une façon générale les *guinea* sont plus rustiques que les *caudatum* (Bazile *et al.*, 2008). Les mêmes constats ont été rapportés par plusieurs auteurs au Mali, Niger, Burkina Faso et Kenya (Rattunde *et al.*, 2013 ; House *et al.*, 1997; Haussmann *et al.*, 1998). Les deux génotypes les plus performants à la fois en termes de grain et biomasse paille (Fadda

et Nieleni) pourraient être recommandés comme génotypes double usage grain et biomasse paille pour nos zones d'expérimentations (Sinthiou Malem et Nioro du Rip) avec des dates de semis normales (précoces) et l'idéal serait qu'ils aient aussi une bonne qualité fourragère.

Les résultats ont montré aussi que l'aptitude au double usage des génotypes s'est exprimée principalement dans les environnements avec des dates de semis normales (précoce, semis en date 1) et que les environnements à dates de semis tardives ont eu tendance à pénaliser les productions de biomasse et de grains et à rendre les génotypes peu ou pas apte au double usage. Cela s'est révélé d'autant plus quand les conditions agro-climato-pédologiques étaient très contraignantes, et ce sont les *caudatum* qui y ont été les plus sensibles.

Ces conclusions confirment l'intérêt d'un semis précoce pour améliorer l'aptitude au double usage des génotypes. Des résultats similaires pointant du doigt l'effet bénéfique d'un semis précoce sur les performances du sorgho en termes de production de biomasse et/ou de grains dans différents environnements de culture chauds et secs d'Asie, d'Amérique et d'Afrique ont été obtenus par Voigt *et al.* (2008), Erickson *et al.* (2011), Reddi *et al.* (2013) et Gutjahr *et al.* (2013b). Cependant ces derniers (Gutjahr *et al.*, 2013b) n'avaient pas noté d'effet significatif de la date de semis sur le rendement en grains du fait des attaques d'oiseaux auxquelles leur expérimentation avait été confrontée.

2.6 Conclusion

Dans la présente étude, le modèle AMMI a montré que les rendements grains et biomasses pailles ont fortement été influencés par les génotypes, les environnements et l'interaction génotype-environnement. Les environnements ont provoqué des réponses différentes des génotypes et la plupart de ces génotypes ont montré une spécificité environnementale. Les facteurs fertilité globale du sol et cumul pluviométrique durant l'expérimentation ont été une source importante de variation des réponses des génotypes. 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. Il en ressort de cette étude aussi que les génotypes à bonne stabilité phénotypique présentaient de faibles performances. L'étude a également mis en évidence que (1) parmi les génotypes étudiés, ceux qui présentent plus d'intérêt pour la double production étaient Nieleni et Fadda, et (2) qu'une date de semis précoce est bénéfique pour l'expression de l'aptitude au double usage. De plus, les résultats ont indiqué que les génotypes Nieleni, Fadda, Pablo sont les plus performantes en termes de grains, ce que les conditions de cultures soient bonnes ou mauvaises. Ce résultat rejoint ceux de différents auteurs concernant

la « supériorité » des hybrides *guinea*. Le génotype témoin sénégalais 621B apparaît comme ayant un très bon potentiel (car elle peut produire plus de 3 tonnes à l'hectare dans de bonnes conditions agro-pédologiques comme celles de S16D1) mais il se révèle comme étant particulièrement sensible aux conditions de culture, en particulier aux conditions de sol. Ces résultats nous conduisent à recommander les variétés Fadda et Nieleni pour nos régions d'étude. Le modèle statistique AMMI a montré son intérêt comme outil pour aider à recommander des génotypes de sorgho comme d'autres cultures. Afin d'expliquer ces différences de performances génotypiques, d'autres études sont nécessaires en mettant en relation ces résultats avec d'autres caractères phénologiques, morphologiques et de croissance et leur plasticité phénotypique.

Chapitre 3 : Plasticité phénotypique du sorgho double usage : relations entre rendements en grains et en biomasse paille et caractères d'intérêt

Article de journal en préparation

Malick Ndiaye, Myriam Adam, Bertrand Muller, Komla Kyky Ganyo, Aliou Guissé et Ndiaga Cissé. **Plasticité phénotypique du sorgho double usage : relations entre rendements grain et biomasse paille et caractères d'intérêt.** En cours de soumission dans Field Crops Research

Communication scientifiques orale

Malick Ndiaye, Myriam Adam, Bertrand Muller, Aliou Guissé et Ndiaga Cissé. **Caractérisation agro-morphologiques du potentiel de sorghos double usages au Sénégal.** Conférence annuel du **DP IAVAO** (Dispositif de Recherche et d'Enseignement en Partenariat "Innovation et Amélioration Variétale en Afrique de l'Ouest") tenu du 06 au 09 Décembre 2016 à Saly, Mbour, Sénégal.

3.1 Résumé

La production combinée de grains et de biomasses, deux produits très appréciés, implique pour la sélection du sorgho le développement de variétés à double usage présentant des productions de grains et biomasses élevées. Ce qui nécessite une amélioration « générale » de la plante plutôt que de se concentrer sur l'amélioration de caractères relatifs au grain ou à la biomasse. Dix génotypes de sorgho contrastés du point de vue phénologie, architecture, hauteur et rendements ont été utilisés pour identifier différents types de plante (grain, biomasse et double production) et des caractères ou groupes de caractères d'intérêt potentiel pouvant aider au développement d'un sorgho double usage (grain et biomasse). La plasticité phénotypique de ces caractères a été particulièrement adressée. Dix-huit caractères relatifs à la phénologie, à la morphologie, croissance et production en grains et biomasse paille ont été évalués à travers des essais implantés en 2013 à 2016 à Bambey, Sinthiou Malem et Nioro du Rip suivant un dispositif en blocs complets randomisés avec quatre répétitions. Les résultats ont mis en évidence trois types de production. Le premier type production de biomasse regroupe les génotypes IS15401 et SK5912 et est fortement lié à la durée du cycle, la surface foliaire et à la hauteur de la plante. Le second type production de grain regroupe les *caudatum* 621B, F2-20 et Soumba fortement associé au nombre de grain par panicule et de la largeur de la feuille drapeau. Enfin, le troisième type double production (Fadda, Nieleni et Pablo) combine des caractères favorables pour le grain et la biomasse. Les corrélations favorables présentées dans cette étude ont montré aussi que des rendements en grains et biomasses élevés associés à certains caractères recherchés pourraient être incorporés dans un seul génotype de sorgho. L'étude a montré aussi que des caractères recherchés comme la production de talles, le nombre de grains par panicule, le LAI et la longueur moyenne d'entrenœud avaient une forte plasticité phénotypique, et qu'ils s'exprimaient mieux dans des environnements agropédoclimatiques favorables (comme Sinthiou Malem). D'autres caractères également souhaitables tels que la durée du cycle, le poids de mille grains, le nombre et la taille des feuilles et la grosseur de la tige sont peu plastiques et donc plus facilement utilisables par la sélection. Par ailleurs, un rendement élevé et stable en grains est associé à une taille de feuille drapeau, de phénologie et de nombre de grains par panicule stables et celui en biomasse paille à une stabilité du diamètre de la tige.

Mots clés : Sorgho, génotype, plasticité phénotypique, double production, association

3.2 Introduction

Le sorgho est une culture d'importance mondiale, se classant au cinquième rang parmi les cultures céréalières importantes (Chantereau et Nicou, 1994). En Afrique subsaharienne, c'est sans doute la culture céréalière la plus importante. C'est une source importante de nourriture pour l'homme et d'aliments pour animaux dans les systèmes de production mixtes agriculture-élevage, où sa double utilisation est une option privilégiée, en particulier chez les petits agriculteurs pauvres en ressources. Puisque le grain et la biomasse sont des produits très appréciés, un aspect important de la sélection du sorgho est le développement de variétés à double usage présentant des productions de grains et biomasses élevées, ce qui nécessite une amélioration « générale » de la plante plutôt que de se concentrer sur l'amélioration de caractères relatifs au grain ou à la biomasse (Reddy *et al.*, 2013). En plus, cette espèce présente également l'avantage d'une grande diversité génétique et d'un large spectre d'adaptation à divers environnements de culture (Mace *et al.*, 2013).

Pour un sorgho grain, les génotypes présentant (i) un nombre de grains et (ii) une taille de panicule élevés, (iii) le stay-green, (iv) une capacité de tallage élevée, (v) une floraison précoce à semis-précoce, (vi) une forte et courte tige et (vii) des grains blancs sans couleur de testa sont à considérer (Nyadanu *et al.*, 2014 ; Khandelwal *et al.*, 2015 ; Jain *et al.*, 2013 ; Hassan et Mohamed, 2015). Pour un sorgho biomasse les caractères à rechercher sont (i) la sensibilité à la photopériode pour favoriser le développement en hauteur des plantes (taille moyenne à élever), (ii) un diamètre de tige épais, (iii) tiges douces et juteuses, (iv) taille et surface des feuilles élevées (Khandelwal et Keerthika, 2016 ; Kisua *et al.*, 2015 ; Awan *et al.*, 2015). Ainsi, pour assurer un double usage un génotype combinant tous ces caractères pourrait être d'intérêt pour les environnements en proie à la sécheresse (Gutjahr *et al.*, 2103b).

Cependant, la sélection de génotypes à haut double rendement nécessite des informations sur la nature et l'ampleur de la variation du matériel disponible, les liens (*trade-off*) entre le rendement et d'autres caractères agronomiques et le degré d'influence environnementale sur l'expression de ces caractères. La capacité d'un génotype à modifier sa morphologie, sa physiologie ou son développement en réponse à des changements de son environnement habituel est appelée « plasticité phénotypique » (Callahan *et al.* 1997 ; Bradshaw, 1965 ; Sultan, 2000 ; Scheiner, 1993). La recherche sur la plasticité phénotypique a commencé au début du XXe siècle, mais les travaux des pionniers ont été largement négligés, à quelques exceptions près (par exemple, Bradshaw, 1965). Ce n'est qu'au cours des dernières décennies que la

communauté scientifique a retrouvé de l'intérêt pour ce concept (Sultan, 1987 ; Via, 1992 ; Dejong, 1995 ; Dewitt et al., 1998 ; Agrawal, 2001 ; Hughes *et al.*, 2002 ; Schlichting, 2002 ; Sultan, 2005) en reconnaissant largement la plasticité phénotypique comme facteur de diversité phénotypique et donc comme un point important à considérer pour comprendre la manière dont les plantes se développent, fonctionnent et évoluent selon les environnements. La plasticité phénotypique dans les cultures est un mécanisme majeur pour assurer l'adaptation des plantes dans des environnements variables.

La plasticité phénotypique est habituellement mesurée en utilisant un dispositif expérimental impliquant plusieurs répétitions du même génotype réparties entre quelques environnements écologiquement distincts et significatifs. Souvent, des expérimentations multi-locales, où la variabilité entre les environnements est incontrôlée, peuvent être utilisées à cette fin (Chambel *et al.*, 2005). En effet, face à un changement environnemental donné, les phénotypes des caractères peuvent changer ou rester fixes. De ce fait, quantifier la plasticité du phénotype permet de distinguer les combinaisons génotypiques des caractères stables qui sont importants pour la sélection et des caractères plastiques qui sont importants à combiner avec des environnements spécifiques.

Étant probablement un centre d'origine et diversification du sorgho, la zone Soudano-sahélienne est dotée d'une riche variabilité génétique du sorgho (Yasin, 1978) permettant la sélection pour la plupart des caractères économiques (Mahmoud *et al.*, 1996). En revanche, les efforts locaux pour exploiter une telle variabilité pour développer des types de sorgho double usage (grain et paille) ont été très limités et principalement orientés vers le développement de types de grains améliorés. L'amélioration simultanée des rendements en grains et biomasse pourrait contribuer à répondre à la demande de fourrage et de nourriture et permettre une utilisation maximale des ressources de l'agriculteur. Les efforts de recherche de ce type sont très rares ou manquent dans nos zones.

Ainsi, la présente étude a pour objectif de caractériser les développements et performances de dix génotypes de sorghos en différents sites du Sénégal, pour pouvoir identifier différents idéotypes (plant-type) et leurs caractères d'intérêt potentiel pouvant aider au développement d'un sorgho double usage (grain et biomasse), en étudiant en particulier si ces caractères sont stables ou spécifiques à des environnements cibles.

3.3 Matériel et Méthodes

3.3.1 Sites expérimentaux

Les expérimentations ont été menées lors des saisons des pluies 2013, 2014, 2015 et 2016 en trois stations de recherche de l'Institut Sénégalais de Recherches Agricoles (ISRA), à savoir les stations de Sinthiou Malem (en 2013, 2014, 2015 et 2016), Bambey (en 2013) et Nioro du Rip (en 2015). Les caractéristiques des sites, la conduite des essais et le dispositif expérimental ont été décrits au chapitre 2.

3.3.2 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 dans le tableau 4.

Tableau 4: caractéristiques des dix génotypes étudiés.

Génotype	Code	Type	Photosensibilité	Durée du cycle	Finalité	Hauteur plant	Rendement potentiel	Couleur Grain	Origine
FADDA	G1	GH	Moyenne	Tardive	Grain-biomasse	moyenne	4,5t/ha	Crème	MLI
NIELENI	G2	CH	Faible	Moyenne	Grain-biomasse	moyenne	4t/ha	Blanche	MLI
IS15401	G3	GC	Forte	Tardive	Biomasse	grande	2t/ha	Blanche	CMR
PABLO	G4	GH	Moyenne	Moyenne	Biomasse	grande	4 t/ha	Blanche	MLI
CSM63E	G5	G	Faible	Précoce	Biomasse	grande	2t/ha	rougeâtre	MLI
SK5912	G6	C	Forte	Tardive	Grain-biomasse	courte	2,5-3,5 t/ha	Blanche	NGR
GRINKAN	G7	C	Non	Précoce	Grain-biomasse	courte	4t/ha	Blanche	MLI
SOUMBA	G8	C	Faible	Moyenne	Grain-biomasse	moyenne	2,5t/ha	Blanche	MLI
621B	G9	C	Non	Moyenne	Grain-biomasse	courte	2,5-3t/ha	Blanche	SN
F2-20	G10	C	Faible	Moyenne	Grain	moyenne	3- 5,3t/ha	Blanche	SN

Hauteur de la plante= courte = < 2m, moyenne= de 2 à 3m, grande= > 3m ; Durée du cycle= précoce <= 90 jours, moyenne de >90 à 115 jours, tardive > 115jours ; C= Caudatum ; G= Guinea ; GC= Guinea-Caudatum ; GH=Guinea-Hybride ; CH = Caudatum-Hybride ; CMR= Cameroun, SN= Sénégal, MLI=Mali ; NGR= Nigéria.

3.3.3 Mesures, observations et paramètres calculés

Les paramètres suivants ont été mesurés, ou calculés, à la floraison sur les différents essais : la durée entre le semis et le début de la floraison mâle (durée semi-floraison ; DSF), le nombre de feuilles apparues (NFA), le nombre de feuilles vertes (NFV) et mortes (NFM), la hauteur des plantes du sol jusqu'à la ligule de la feuille drapeau (HP), la longueur (LOFD) et largeur (LAFD) de la feuille drapeau (dernière feuille produite, située juste en dessous de la panicule), la longueur moyenne des entrenœuds (LEN) (rapport entre HP et NFA), le diamètre médian de la tige (DIAM) (mesuré au niveau du 5^{ème} entrenœud), la biomasse totale aérienne (BMF) (biomasse totale des tiges, des feuilles et panicules), l'indice de surface foliaire (LAI), la surface spécifique moyenne des feuilles (SLA) et le nombre de talles par poquet (TAL) (Tableau 5). Les paramètres DSF, NFA, NFV, NFM, HP, LOFD, LAFD, LEN et DIAM ont été déterminés par un suivi de 4 poquets sur chaque parcelle, et plus précisément du brin maître de chacun de ces 4 poquets.

Les stades phénologiques ont été déterminés en respectant les recommandations de l'échelle BBCH (BBCH, 2001 ; Witzemberger *et al.*, 1989 ; Lancashire *et al.*, 1991). Les feuilles ont été marquées régulièrement tous les quinze jours. Les durées DSF ont été exprimées en sommes de températures (TTS) calculées en degrés-jour (°C) à partir des températures maximales (Tmax) et minimales (Tmin) journalières avec une température de base (Tb) de 11 °C selon la formule ci-dessous :

$$TTS = \sum_{i=0}^n \left(\frac{Tmax_i + Tmin_i}{2} - Tb \right) \quad (\text{Eq 3.1})$$

Les biomasses aériennes totales ont été déterminées via des prélèvements réguliers de trois poquets sur des placettes prédéterminées. Les biomasses ont été pré-séchées à l'air puis séchées à l'étuve à 65°C durant 48 h avant d'être pesées. Les LAI ont été estimés sur les mêmes placettes (avant les prélèvements de biomasses) à l'aide d'un SunScan (Delta-T). Le SLA moyen à la floraison a été calculé (en m².g⁻¹) selon la formule ci-dessous :

$$SLA = \frac{LAI}{\text{Biomasse sèche des feuilles}} \quad (\text{Eq 3.2})$$

D'autres paramètres ont été mesurés à la récolte : les rendements en grains (RDTG) et en paille (RDTB), le rapport feuille/tige (FT), le nombre de grains par panicule (NGP) et le poids de mille grains (PMG).

Sur chaque parcelle la récolte a été effectuée à maturité des grains sur une placette centrale de 21 poquets (3 lignes x 7 poquets ; 3,36 m²) sur laquelle on a déterminé les poids de tiges, de feuilles, de panicules (avec grains) et ensuite de grains après battage. Les biomasses ont toutes été pré-séchées à l'air avant un séjour final à l'étuve à 65°C pendant une durée de 48 h. Dans cette étude le rendement en paille correspond uniquement aux biomasses sèches des feuilles et des tiges car ce sont elles qui sont utilisées (bétail, construction, etc.). Des compteurs de grains ont été utilisés pour déterminer les PMG.

La plasticité phénotypique d'un caractère donné pour un génotype donné a été calculée comme étant le rapport entre l'écart-type des valeurs moyennes du caractère dans les différents environnements et sa moyenne génotypique générale :

$$\text{Plasticité} = \frac{\text{Ecart-type génotypique}}{\text{Moyenne génotypique}} \quad (\text{Eq 3.3})$$

Tableau 5: Abréviation, définition et caractères étudiés.

Abréviation	Définition	Unité
DSF	Durée semis-floraison en degrés-jour	°Cj
HP	Hauteur plant à la floraison	cm
LEN	Longueur moyenne entrenœud à floraison.	cm
LOFD	Longueur feuille drapeau à floraison	cm
LAFD	Largeur feuille drapeau à floraison	cm
DIAM	Diamètre médian de la tige à floraison	cm
NFA	Nombre de feuilles apparues à floraison	
NFV	Nombre de feuilles vertes à floraison	-
NFM	Nombre de feuilles mortes à floraison	-
FT	Biomasse feuilles sur biomasse tiges à récolte	-
TAL	Nombre de talles par poquet à floraison	-
LAI	Indice de surface foliaire à floraison.	-
SLA	Surface spécifique des feuilles à floraison.	m ² . g ⁻¹
BMF	Biomasse sèche à floraison	g.m ²
NGP	Nombre de grains par panicule	-
PMG	Poids de mille grains	g
RDTB	Rendement en biomasse paille	Kg.ha ⁻¹
RDTG	Rendement en grains	Kg.ha ⁻¹

3.3.4 Analyse statistique des données

Une analyse de la variance combinée a été effectuée sur l'ensemble des caractères étudiés pour tester les effets des environnements, des génotypes et interactions génotype-environnement. Les moyennes significativement différentes ont été dégagées par comparaisons suivant le test de Newman-Keuls au seuil de 5 %. Une analyse en composante principale (PCA) a été effectuée à partir de la matrice de données standardisées pour mieux visualiser les liaisons complexes qui existent entre les caractères mesurés et les différents génotypes étudiés. Les caractères et les génotypes étudiés ont ensuite été projetés dans l'espace des composantes principales de l'PCA. Toutes les analyses statistiques ont été effectuées en utilisant le logiciel R version 3.2 (R Development Core Team, 2015).

3.4 Résultats

3.4.1 Performances agronomiques des génotypes selon les caractères étudiés

Un effet hautement significatif du génotype (G) et de l'environnement (E) a été observé sur tous les caractères mesurés à l'exception du SLA (Tableau 6). De plus une interaction significative du génotype et de l'environnement (G x E) a été notée sur l'ensemble des caractères à l'exception du SLA et du DIAM. La valeur moyenne des rendements en grains (moyenne des RDTG) a été 1454 Kg.ha⁻¹ (tableau 6). Nieleni a obtenu le RDTG le plus élevé (2018 Kg.ha⁻¹) suivi de Fadda (1833 Kg.ha⁻¹). Le plus faible RDTG a été obtenu par SK5912 (807 Kg.ha⁻¹). Pour le rendement en biomasse (RDTB), IS15041 (10479 Kg.ha⁻¹) et SK5912 (9916 Kg.ha⁻¹) ont obtenu les rendements les plus élevés alors que la plus faible valeur a été enregistrée chez 621B (4385 Kg.ha⁻¹). Pour le nombre de grains par panicule (NGP) la valeur la plus élevée a été enregistrée chez Nieleni (2279) alors que SK5912 (711) a montré la plus faible valeur. La valeur moyenne globale du poids de mille grains (PMG) a été de 16,9 g et SK5912 et IS15401 ont obtenu les valeurs les plus élevées avec respectivement 23,3 g et 23,5 g.

Pour le cycle, CSM63E et Soumba ont été les plus précoces avec respectivement des durées semis-floraison (DSF) de 1095 °Cj et de 1274 °Cj (tableau 6). En revanche, SK5912 (1850 °Cj) et IS15041 (1648 °Cj) ont été les plus tardifs. La valeur moyenne générale de la hauteur (HP) a été de 185,6 cm. IS15401 a enregistré la valeur la plus élevée (313,3 cm) suivi par Pablo (277,2 cm), CSM63E (228,0 cm) et Fadda (208,5 cm). La longueur moyenne d'entrenœud (LEM) la plus longue a été trouvée chez CSM63E (14,9 cm) alors que les plus courtes ont été vues chez 621B (5,9 cm) et Grinkan (5,7 cm). Le diamètre de tiges (DIAM) a été en moyenne sur tous les génotypes de 1,6 cm et SK5912 a obtenu la valeur la plus élevée (2,2 cm) suivi de Grinkan (1,9 cm) et de Nieleni (1,8 cm). En revanche CSM63E a montré la valeur la plus faible (1,2 cm).

Pour la taille de la feuille, les valeurs moyennes globales de longueur (LOFD) et largeur (LAFD) de feuille drapeau ont été respectivement de 43,3 cm et de 5,9 cm. Les valeurs les plus élevées de LOFD ont été notées chez CSM63E (50,0 cm) et Fadda (48,4 cm) et les plus grandes LAFD chez Nieleni (7,0cm) et F2-20 (6,7cm). Par contre IS15401 a obtenu les plus faibles valeurs de LOFD (33,2 cm) et LAFD (4,3 cm). Les génotypes à cycle long SK5912 et IS15401 ont obtenu les valeurs les plus élevées pour les nombres de feuilles produites (NFA), mortes (NFM) et vertes (NFV) à floraison avec des valeurs respectivement égales à 30 et 27, 16 et 15, et 12 et 14. En revanche, CMS63E a enregistré les plus faibles valeurs pour ces caractères avec

des valeurs de respectivement 19, 10 et 9 (tableau 3-3). La valeur moyenne globale du nombre de talles (TAL) a été de 0,4. IS15401 (0,9) et Pablo (0,7) ont obtenu les valeurs les plus élevées alors que SK5912 (0,0) et 621B (0,2) ont enregistré les plus faibles.

Pour la biomasse aérienne totale à floraison (BMF) et pour le LAI, IS15401 et SK5912 ont obtenu les valeurs les plus élevées avec respectivement 1226 g.cm^{-2} et 955 g.cm^{-2} pour BMF, et 2,4 et 2,9 pour LAI. A l'opposé 621B (477 g.cm^{-2}) et CSM63E (1,7) ont enregistré les valeurs les plus faibles respectivement pour BMF et LAI.

La valeur moyenne globale pour le ratio feuille/tige (FT) est de 0,28, et Soumba (0,37) et 621B (0,40) ont obtenu les valeurs les plus élevées, suivis de Grinkan (0,30) et F2-20 (0,30) alors que IS15401 et CSM63E ont enregistré les plus faibles valeurs avec respectivement 0,18 et 0,21.

Pour le SLA, CSM63E a obtenu la valeur la plus élevée ($0,023 \text{ m}^2\cdot\text{g}^{-1}$) suivi de Pablo (0,018) et de Nieleni ($0,018 \text{ m}^2\cdot\text{g}^{-1}$), alors que IS15401 et F2-20 ont enregistré les plus faibles valeurs avec respectivement $0,012 \text{ m}^2\cdot\text{g}^{-1}$ et $0,013 \text{ m}^2\cdot\text{g}^{-1}$ (tableau 6).

Tableau 6: Performance moyenne des caractères étudiés en relation aux rendements grain et biomasse des dix génotypes évalués.

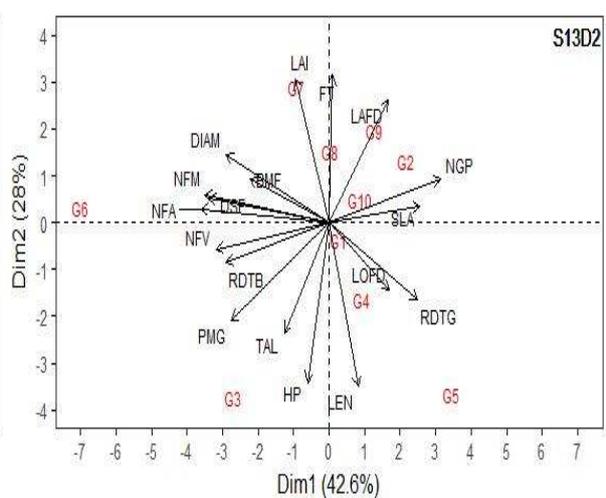
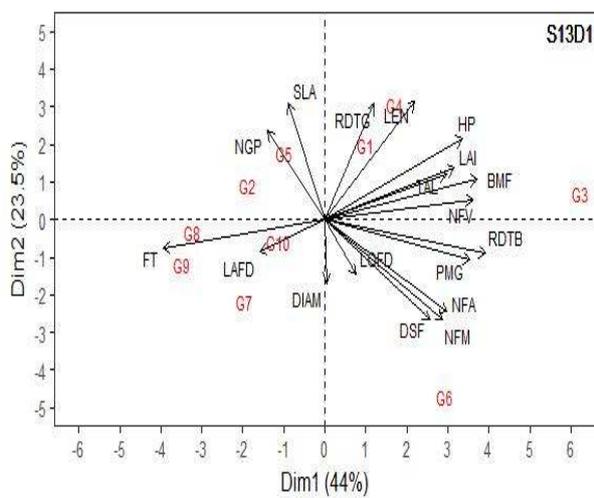
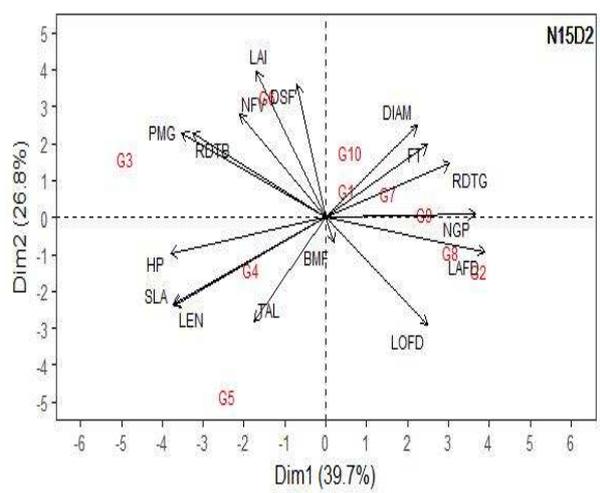
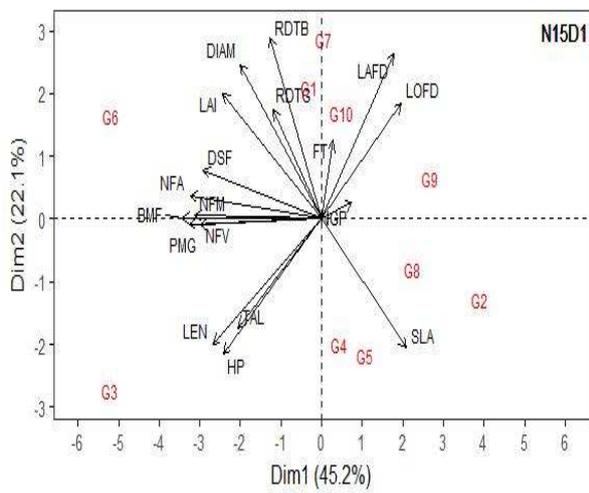
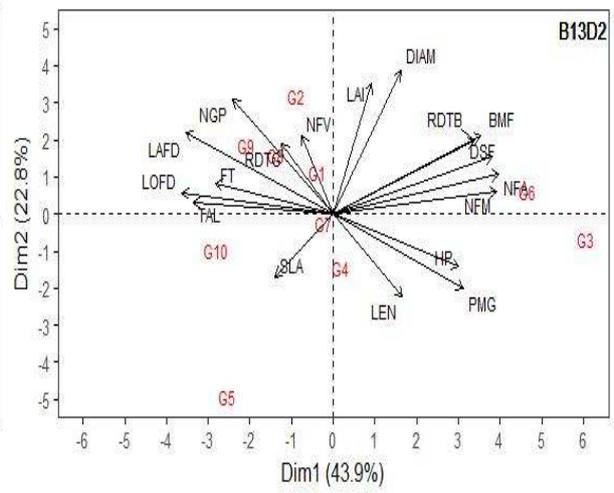
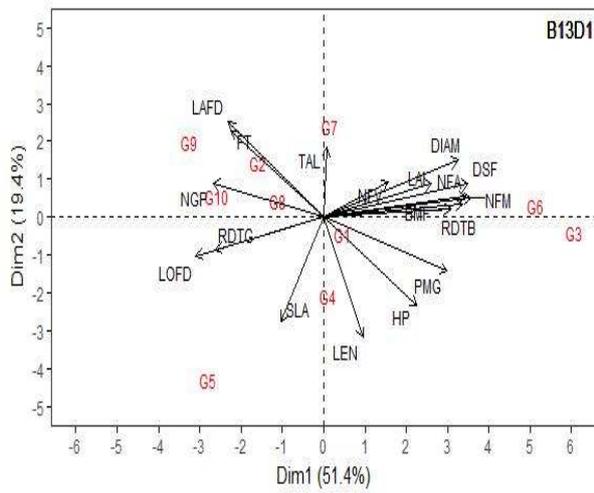
Génotype	DSF	HP	LEN	LAFD	LOFD	DIAM	NFA	NFM	NFV	TAL	FT	BMF	LAI	SLA	NGP	PMG	RDTB ^A	RDTG ^C	Rang moyen ^D
Fadda	1411 ^c	208,5 ^c	10,2 ^b	5,9 ^{cd}	48,4 ^{ab}	1,6 ^b	24 ^c	13 ^b	12 ^b	0,6 ^{ab}	0,24 ^c	8488 ^{bc}	2,5 ^{ab}	0,015 ^{ab}	1563 ^{bc}	16,0 ^c	7812 ^b (3)	1833 ^{ab} (2)	2,5
Nieleni	1372 ^{cd}	143,5 ^{de}	7,4 ^c	7,0 ^a	43,1 ^{bc}	1,8 ^b	22 ^c	12 ^{bc}	11 ^{bc}	0,3 ^{cd}	0,26 ^c	666 ^{cde}	2,4 ^{abc}	0,018 ^{ab}	2279 ^a	13,6 ^d	6701 ^{bc} (5)	2018 ^a (1)	3,0
IS15401	1648 ^b	313,3 ^a	14,3 ^a	4,3 ^f	33,2 ^d	1,7 ^b	27 ^b	15 ^a	14 ^a	0,9 ^a	0,18 ^d	1226 ^a	2,4 ^{abc}	0,012 ^b	842 ^{fg}	23,5 ^a	10479 ^a (1)	1402 ^c (5)	3,0
Pablo	1292 ^d	277,2 ^b	14,2 ^a	5,4 ^{de}	43,5 ^{bc}	1,3 ^c	23 ^c	12 ^{bc}	11 ^{bc}	0,7 ^{ab}	0,23 ^{cd}	707 ^{cd}	2,2 ^{abc}	0,018 ^{ab}	1229 ^{cde}	18,5 ^b	6623 ^{bc} (7)	1615 ^{bc} (3)	5,0
CSM63E	1095 ^e	228,0 ^c	14,9 ^a	4,9 ^e	50,0 ^a	1,2 ^c	19 ^d	10 ^c	9 ^c	0,3 ^{cd}	0,21 ^{cd}	526 ^{de}	1,7 ^c	0,023 ^a	1067 ^{ef}	17,9 ^b	4704 ^d (9)	1358 ^c (7)	8,0
SK5912	1850 ^a	160,0 ^d	7,0 ^c	5,2 ^e	40,7 ^c	2,2 ^a	30 ^a	16 ^a	12 ^{ab}	0,0 ^c	0,26 ^c	955 ^b	2,9 ^a	0,014 ^b	711 ^g	23,3 ^a	9916 ^a (2)	807 ^d (10)	6,0
Grinkan	1427 ^c	119,1 ^{ef}	5,7 ^c	6,5 ^{abc}	45,8 ^{abc}	1,9 ^b	25 ^c	14 ^b	11 ^{bc}	0,4 ^b	0,33 ^b	580 ^{de}	2,3 ^{abc}	0,014 ^b	1174 ^{de}	14,6 ^{cd}	6846 ^{bc} (4)	1281 ^c (9)	6,5
Soumba	1274 ^d	150,1 ^{de}	7,5 ^c	6,2 ^{bc}	41,3 ^c	1,5 ^{bc}	23 ^c	11 ^{bc}	11 ^b	0,2 ^{ab}	0,37 ^{ab}	602 ^{de}	2,2 ^{abc}	0,016 ^b	1540 ^{bc}	14,2 ^d	5482 ^{cd} (8)	1443 ^c (4)	6,0
621B	1286 ^d	102,2 ^f	5,9 ^c	6,6 ^{ab}	46,4 ^{abc}	1,7 ^b	20 ^d	10 ^c	10 ^{bc}	0,2 ^a	0,40 ^a	477 ^c	1,9 ^c	0,016 ^b	1615 ^b	13,5 ^d	4385 ^d (10)	1394 ^c (6)	8,0
F2-20	1318 ^d	153,8 ^{de}	7,8 ^c	6,7 ^{ab}	40,7 ^c	1,7 ^b	23 ^c	11 ^{bc}	11 ^{bc}	0,3 ^b	0,33 ^b	592 ^{bc}	2,0 ^{bc}	0,013 ^b	1431 ^{bcd}	14,2 ^d	6636 ^{bc} (6)	1333 ^c (8)	7,0
Moyenne	1397	185,6	9,5	5,9	43,3	1,6	23	12	11	0,4	0,28	718	2,3	0,016	1345	16,9	6952	1454	
B (E)	**	**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	***	ns	ns	ns	ns	ns	ns	***	**	
G	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	**	***	***	***	***	***
E	***	***	***	***	***	***	***	***	**	***	***	***	***	ns	***	***	***	***	***
G*E	****	***	***	***	***	ns	***	***	***	***	***	***	***	ns	***	***	***	***	***

Pour chaque colonne, les moyennes qui ont la même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de 5% selon le test de Newman-Keuls * P < 0,05 ; ** P < 0,001 ; *** P < 0,0001 ; ns= non significatif (P > 0,05). D = le rang moyen correspondant à la moyenne des rangs qu'occupe un génotype pour les rendements grain et biomasse paille, sachant que la valeur de rang 1 correspond au mieux classé. DSF=durée semis-floraison, en °C ; HP=hauteur de la plante, en cm ; LAFD= largeur feuille drapeau, en cm ; LOFD= longueur feuille drapeau, en cm ; DIAM=diamètre de la tige, en cm ; NFV= nombre de feuilles vertes ; NFM=nombre de feuilles mortes ; NFA = nombre de feuilles apparues. LEN = longueur entrenœud, en cm ; FT= rapport feuilles/tiges ; TAL= nombre de talles par poquet ; NGP= nombre de grains par panicule ; LAI=indice de surface foliaire. SLA= surface spécifique d'une feuille ; BMF= biomasse sèche à la floraison, en kg/ha ; PMG= poids milles grains, en g ; RDTB = rendement biomasse paille, en kg/ha ; RDTG = rendement grains, en kg/ha. A et C = les chiffres entre parenthèses correspondent au rang qu'occupe un génotype donné en termes de rendements grain et biomasse paille respectivement. B= bloc.

3.4.2 Variation du rendement et des caractères contributifs

L'analyse des composantes principales (PCA) a été utilisée pour caractériser la répartition des différents caractères par rapport aux rendements en grains et en biomasses paille dans chacun des onze environnements (figure 11). Les deux premières composantes principales (PC) ont expliqué en moyenne 65 % de la variabilité. On note indépendamment des environnements pour le rendement biomasse paille (RDTB) des associations positives avec le PMG, la BMF, le NFV, le NFA, le DIAM et la DSF. De même, les caractères LAI, LEN et HP ont montré aussi des liaisons positives avec le RDTB à l'exception des environnements S15D1 et S16D1 pour le LAI et S14D2 et N15D1 pour LEN et HP. Parmi ces caractères, la DSF, la BMF, le LAI, le DIAM et le NFV ont montré les plus fortes liaisons. Pour le rendement grain (RDTG), les caractères NGP, LOFD et LAFD ont montré de fortes liaisons positives avec le RDTG sur presque tous les environnements. D'autres caractères ont été aussi associés au RDTG dans certains environnements, comme le SLA pour les environnements B13D1, B13D2, S13D1, S13D2 et S16D1. Il en est de même du LAI vis-à-vis des environnements B13D2, N15D1, S13D1 et S16D1. Ces différences de résultats suggèrent un impact environnemental pour ces caractères. Il est intéressant de noter que certains caractères ont révélé des liaisons positives à la fois vis-à-vis de RDTG et de RDTB, comme le TAL, le DIAM, la LEN et le NFV, et ce dans la plupart des environnements. Ceci indique la possibilité de combiner simultanément des niveaux élevés de rendements en grains et en biomasses paille chez un génotype.

En ce qui concerne les génotypes, pour le RDTB, deux génotypes, SK5912 et IS15401, lui sont toujours associés et parfois Fadda, Grinkan, Nieleni et Pablo selon les environnements. Concernant RDTG les génotypes 621B, F2-20, Soumba et Fadda ont montré des liaisons avec lui sur l'ensemble des environnements alors que les génotypes Nieleni, Pablo, IS15041 et CSM63E lui ont été parfois associés selon les environnements. Ainsi, les génotypes SK5912 et IS15401 que l'on pourrait appeler de « type biomasse » car associé à RDTB, se sont distingués par leurs fortes corrélations avec le LAI, la DSF et le DIAM (taille organe) alors que les génotypes 621B, F2-20 et Soumba, que l'on pourrait dire de « type grain » car associé à RDTG, ont été fortement corrélés à LOFD et NGP. Les génotypes Fadda, Nieleni, Pablo et IS15401 associés à la fois aux RDTG et RDTB ont pour leur part été très corrélés aux caractères NFV, NGP, LEN et DIAM. Cependant, il a été noté dans certains environnements des exceptions pour ces constats notamment en N15D1 où les caractères LOFD et LAFD ont été corrélés au RDTB et où IS15401 était associé aux LEN, TAL et HP. C'est le cas aussi de l'environnement S14D2 où la LOFD a été négativement corrélée au RDTG.



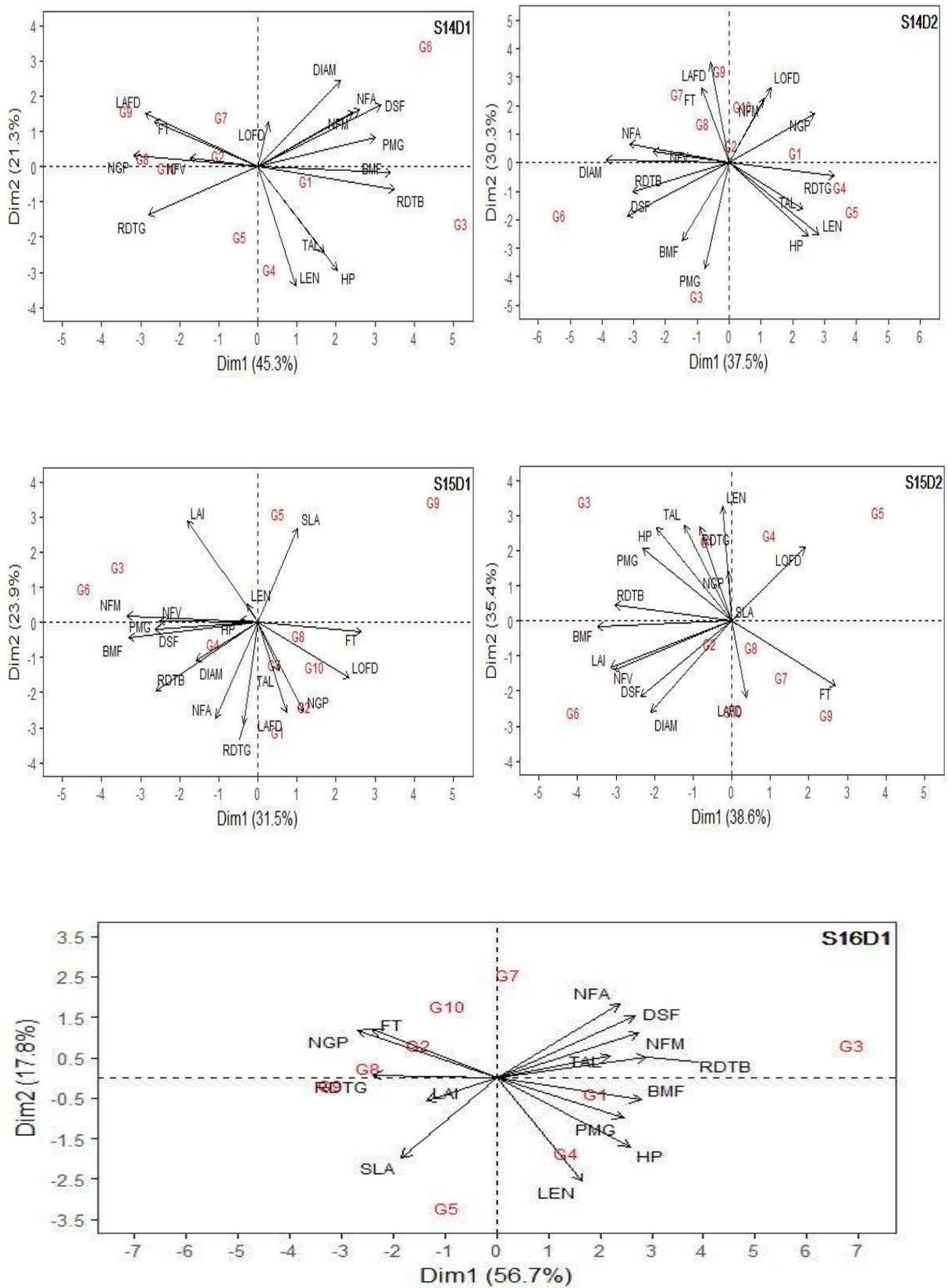


Figure 11: Analyses en composantes principales pour chacune des situations liaisons entre les rendements grains et biomasses et les différents caractères étudiés.

3.4.3 Plasticité phénotypique induite par les environnements

Les plasticités phénotypiques des caractères étudiés, reproductifs et non-reproductifs, révélées par les différents environnements, sont présentées aux figures 12A et 12B. De fortes différences ont été observées pour ces plasticités selon les types de plante. Ainsi pour les génotypes SK5912 et IS15401, de « type biomasse », le LAI et le SLA ont été très peu plastiques alors que les caractères relatifs à la hauteur de la plante (HP, LEN), à la production de feuilles (NFA) et aussi certains caractères fortement corrélés au rendement grains (LOFD, LAFD et NGP) ont été fortement plastiques. Spécifiquement, pour la SK5912 certains caractères se sont révélés très peu plastiques (DIAM et BMF) et d'autres fortement plastiques (HP). De même, pour IS15401, le PMG était peu plastique alors que le NFV et la DSF se sont révélés très plastiques.

Chez les génotypes qualifiés de « type grain », F2-20, 621B et Soumba, le NFA s'est avéré très peu plastique. De plus, le NFV et le FT ont été très peu plastiques pour 621B et Soumba. Il en est de même du LAI et de la BMF chez F2-20 et Soumba. Cependant, d'autres caractères se sont montrés très plastiques pour ces génotypes : cela a été le cas du TAL pour Soumba et 621B et du PMG et DIAM pour F2-20 et 621B. Il en a été de même des caractères HP, DSF et LEN chez 621B.

Concernant les types de plantes « double-usage » (Fadda, Nieleni et Pablo), de faibles plasticités ont été constatées pour les caractères NGP, PMG, LEN et NFM, et particulièrement pour NFA et DIAM chez Nieleni, DSF chez Fadda et Nieleni, TAL et LEN chez Fadda et Pablo, et enfin HP et LOFD chez Pablo et Nieleni. D'autres caractères tels que DIAM et BMF ont montré des plasticités moyennes pour ces types de plantes « double usage ». Cependant, les caractères NFA et HP pour Fadda, TAL et NFV pour Nieleni et DSF pour Pablo se sont distingués comme très plastiques. Il en a été de même du LAI et SLA pour Fadda et Nieleni.

Des plasticités phénotypiques très différentes ont été aussi observées selon les caractères étudiés. Ainsi pour les composantes du rendement le caractère le plus plastique a été le nombre de talles par poquet (81 - 161,2 %). Une plasticité significative a été observée également pour le nombre de grains par panicule (26,7 - 61,4 %). Le PMG a par contre montré une des plus faibles plasticités phénotypiques et de plus il y a eu très peu de variation entre les génotypes. Cela indique que les environnements l'ont très peu affecté, sans doute parce que les ajustements qui se sont faits précédemment au cours des développements des plants avaient été suffisamment efficaces pour atténuer les concurrences entre organes. Pour les traits non-reproductifs, qui ne sont pas directement liés par des processus de développement séquentiel,

la plasticité a été faible pour DSF, LOFD, LAFD et NFA, et par contre les plus grandes plasticités ont été observées chez BMF, SLA, LEN et LAI. Selon les environnements, les caractères TAL, BMF, LAI et SLA ont donc constitué une forte source de discrimination entre les génotypes alors que ce ne fut pas le cas pour DSF, LAFD, NFA et PMG qui ont très peu varié à travers les environnements.

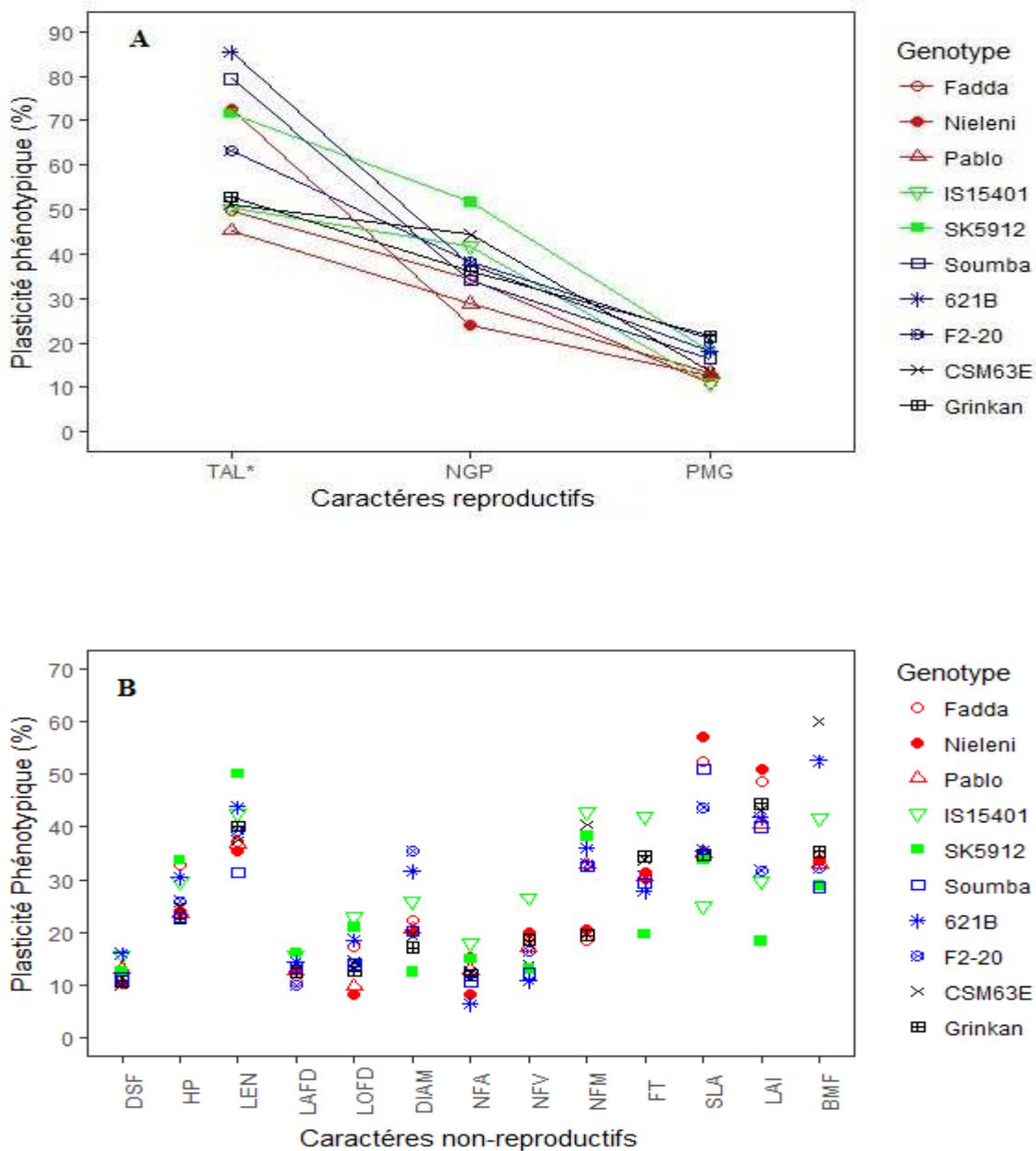


Figure 12 : Plasticité phénotypique des caractères reproductifs (A) et non-reproductifs (B) induite par l'environnement. Le rouge correspond au type double-usage, le vert au type biomasse et le bleu au type grain

DSF=durée semis-floraison ; HP=hauteur de la plante ; LEN : longueur entrenœud ; LAFD= largeur feuille drapeau, LOFD= longueur feuille drapeau ; DIAM=diamètre de la tige. NFA : nombre de feuilles apparues ; NFV= nombre de feuilles vertes ; NFM=nombre de feuilles mortes ; FT= rapport feuilles/tiges ; TAL : nombre de talles apparues. NGP= nombre de grains par panicule ; LAI=indice de surface foliaire ; SLA= surface spécifique d'une feuille ; BMF= biomasse sèche à la floraison ; PMG= poids milles grains. * les valeurs des plasticités du TAL représentent la moitié des valeurs réelles obtenues.

3.4.4 Relation entre plasticité phénotypique et rendements grain et biomasse paille

Pour évaluer les liens entre les rendements en grains et en biomasse paille (caractérisés par leur moyenne génotypique et leur plasticité) et la plasticité phénotypique des caractères étudiés, une analyse en composante principale a été effectuée (figure 13). Les quatre premières composantes ont expliqué environ 76 % de la variabilité. La plasticité phénotypique du rendement en biomasse paille n'a pas été bien représentée par les trois premières composantes, alors que la plasticité phénotypique du rendement grain a été bien représentée pour l'axe 1. La plasticité du rendement grains (pRDTG) a été associée négativement avec la plasticité du LAI, FT et du NFV et positivement avec la plasticité de la taille de la feuille (LAFD, LOFD), de NGP, LEN, TAL et de DSF. Ainsi, un rendement stable en grains a été associé à une taille de feuille stable, de phénologie stable et un nombre de grains par panicule stable. Le rendement génotypique en grain (RDTG) a été positivement corrélé avec l'axe 1. Il a été positivement associé surtout à la plasticité du LAI et du SLA, alors qu'il a été négativement associé à sa propre plasticité (pRDTG), à la plasticité du NGP et à celle de LEN. Ces résultats indiquent qu'un rendement grain (RDTG) élevé est associé avec une taille de feuille qui varie en fonction de l'environnement, alors qu'un rendement stable (non plastique) est fortement associé à des LEN et NGP plastiques (qui sont négativement reliés au RDTG). Ainsi plus NGP et LEN varient en fonction de l'environnement, plus le rendement sera plastique et potentiellement faible.

La plasticité phénotypique du rendement en biomasse paille (pRDTB) a été principalement corrélée avec l'axe 3, ce qui n'a expliqué que 12,2 % de la variation. Elle a été positivement associée à la plasticité du DIAM, du PMG, mais négativement associée à celle du LAFD et du NFM. Pour le rendement en biomasse paille (RDTB), corrélé avec l'axe 2, il a été positivement associé avec la plasticité phénotypique du NFA et NFV. En revanche, il a été négativement lié à la plasticité du LAI, BMF et DIAM (figure 13). Ainsi un rendement en biomasse paille élevé est associé à une stabilité de LAI, BMF et DIAM mais aussi à une plasticité de NFA et NFV.

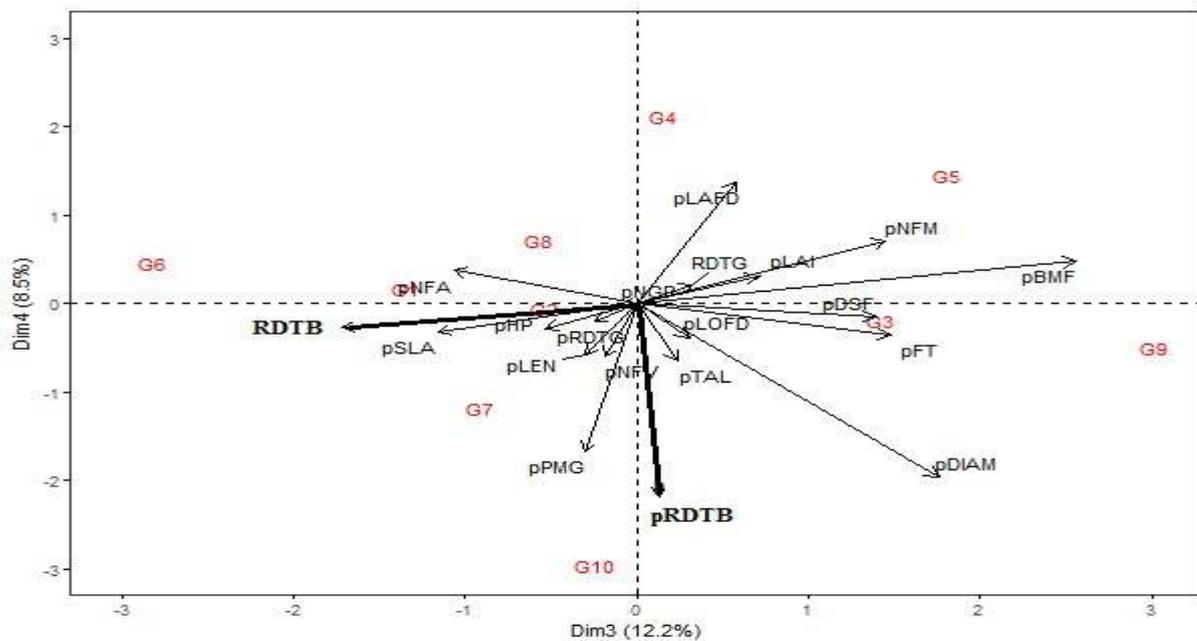
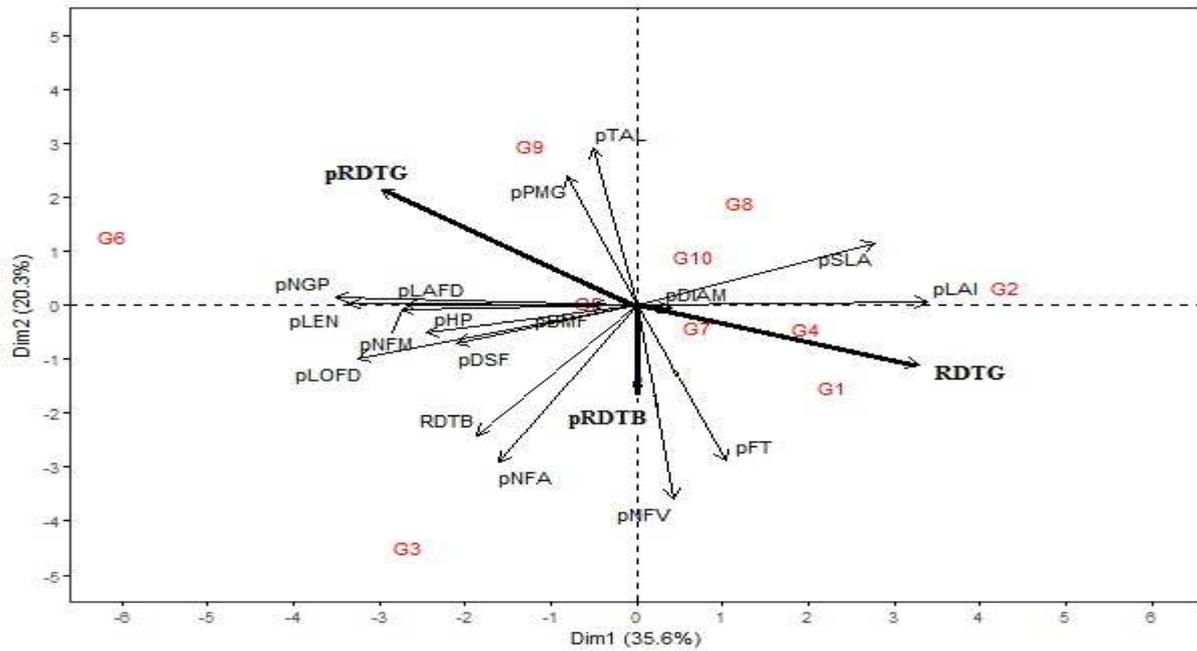


Figure 13 : Relations entre plasticités phénotypiques des traits et rendements en grains et en biomasses paille.

p=plasticité ; pDSF=durée semis-floraison ; pHP=hauteur de la plante ; pLAFD= largeur feuille drapeau, pLOFD= longueur feuille drapeau ; pDIAM=diamètre de la tige ; pNFA : nombre de feuilles apparues. pNFV= nombre de feuilles vertes ; pNFM=nombre de feuilles mortes ; pFT= rapport feuilles/tiges ; pTAL= nombre de talles par poquet. pNGP= nombre de grains par panicule ; pLAI=indice de surface foliaire ; pSLA= surface spécifique d'une feuille ; pBMF= biomasse sèche à la floraison ; pPMG= poids milles grains ; pLEN : longueur entrenœud ; pRDTB = rendement biomasse paille ; pRDTG = rendement en grains.

3.5 Discussions

L'analyse de variance a mis en évidence des effets significatifs ($P < 0,001$) des génotypes, environnements et des interactions génotype-environnement, en particulier pour la durée semis-floraison (DSF), la hauteur de la plante (HP), le LAI et les paramètres du rendement nombre de grains par panicule (NGP) et poids de mille grains (PMG) (Tableau 6). Cela suggère une importante diversité génétique suffisante pour faciliter l'amélioration, grâce à la sélection de ces traits agronomiques. Des résultats de même type ont été rapportés par Abdalla (1991), Bakheit (1990) et Hassan (2005).

3.5.1 Caractères clés pour des génotypes « double usage »

Les génotypes Nieleni et Fadda, Pablo et IS15401 (type *Guinea*), à photosensibilité moyenne à forte, ont été les meilleurs génotypes, se classant en tête pour la double production biomasse paille et grains (tableau 6). Ils ont combiné des caractères plus ou moins comparables pour le double usage : NGP, NFV, LAI et DIAM élevés ; LEN et HP moyennes à élevées. Cependant, sur ces 4 génotypes, IS15401 et Fadda sont les plus intéressants en raison de leurs bonnes performances pour un ou plusieurs des caractères étudiés.

IS15401 a obtenu les meilleures performances en terme de hauteur plante (HP), production de feuille (NFV), de tallage (TAL). En plus, il fait partie des génotypes qui ont le plus gros diamètre de tige (DIAM). Cependant, il fait partie des génotypes les plus tardifs et ayant un faible nombre de grains par panicule (NGP). Or la précocité est considérée comme un facteur clé dans nos systèmes de culture à pluviométrie faible et aléatoire et ressources limitées pour la production. De plus IS15401 a obtenu la valeur la plus faible pour le rapport entre la biomasse feuilles et la biomasse tiges (FT). Habituellement, ce rapport est négativement corrélé au rendement biomasse paille (RDTB) et à la hauteur de la plante (HP), comme on a pu le voir dans notre étude (Figure 11) ou comme cela a été rapporté par d'autres auteurs (Rashida et Mohammed, 2012).

Fadda fait partie des meilleurs génotypes, combinant les rendements les plus élevés en biomasse paille et en grains. Sa biomasse paille et sa production de grains élevées s'expliquent par sa taille (HP), son nombre de feuilles produites (NFA) et son faible rapport entre les biomasses feuille et tige (FT) alors que son rendement en grains élevé est attribuable au nombre élevé de grains par panicule (NGP) couplé à une longueur de feuille drapeau (LOFD) élevée (tableau 6). Ce génotype a été parmi les plus tardifs. Cependant, le fait qu'il soit très productif en grains et

biomasse paille et feuillu (LAI élevé) justifie de le considérer comme un génotype favorisant le double usage.

Nieleni a été aussi parmi les meilleurs génotypes pour le double usage bien qu'il soit limité par sa petite taille (HP) et sa faible production de feuilles (NFA). Mais il présente par contre la valeur la plus élevée de nombre de grains par panicule (NGP). De même, Pablo fait partie des meilleurs « double usage » avec un diamètre de tige (DIAM) moyen et un rapport feuille/tige (FT) élevé, deux caractères qui sont respectivement positivement et négativement corrélés au rendement en biomasse paille (RDTB).

SK5912 et Soumba sont par contre apparus comme peu performants pour le « double usage », et ont différé de la « plante type » par : une longue durée de cycle (DSF), un faible tallage (TAL) et des panicules de petites tailles (NGP) pour SK5912 et un faible tallage (TAL), un faible diamètre (DIAM) et une taille (HP) réduite pour Soumba.

Les génotypes F2-20, 621B, Grinkan et CSM63E ont pour leur part affiché des performances inférieures aux moyennes des rendements en biomasse paille et en grains. Leur faible performance pourrait être due à : un faible tallage (TAL), une faible production de feuilles (NFA) et un faible nombre de grains par panicule (NGP) chez F2-20 ; une taille (HP) courte, une faible production de feuilles (NFA), de talles (TAL) et un faible diamètre de tige (DIAM) chez 621B ; une petite taille (HP), une faible production de talles (TAL), de feuilles (NFA) et des panicules de petites tailles (NGP) chez Grinkan ; et pour CSM63E à un faible diamètre de tige (DIAM), une faible production de feuilles (NFA), de talles (TAL), un rapport feuille/tige élevé (FT) et des panicules de petites tailles (NGP).

3.5.2 Implications associations et plasticité phénotypique des caractères étudiés pour la sélection

Les caractères des plantes cultivées sont généralement corrélés entre eux, et ces corrélations sont des caractéristiques qui peuvent être négatives ou positives dont on tient compte fréquemment en sélection des plantes. Notre étude des corrélations entre caractères a montré que le rendement grain (RDTG) présentait en général des associations positives avec le nombre de grains par panicule (NGP), la largeur (LAFD) et la longueur (LOFD) de la dernière feuille ligulée. La corrélation du rendement grains (RDTG) avec le nombre de grains par panicule (NGP) a été rapportée par de nombreux travaux : Dabholkar *et al.* (1970) ; Abifarin et Pickett (1970) ; Naim *et al.* (2012) et Hassan et Mohammed (2015). Ceci indique qu'une forte association de ce caractère avec le RDTG pourrait être exploitée avec succès pour améliorer le

potentiel de rendement du sorgho. Ainsi, Akhond *et al.* (1998) ont suggéré que pour l'amélioration du rendement en grain, la sélection pourrait être faite principalement sur le nombre de grains par panicule et également sur le nombre de panicules par plante. La corrélation entre le rendement en biomasse paille (RDTB) et les caractères durée semis-floraison (DSF), hauteur de la plante (HP), LAI, production de feuilles (NFV, NFA), diamètre de tige (DIAM) et poids de mille grains (PMG) montre l'importance de ces caractères pour l'amélioration du RDTB (Kumar *et al.*, 2012 ; Kishore et Singh, 2005 ; Jain et Patel, 2008 ; Mallinath *et al.*, 2004). L'étude a montré aussi que les caractères DIAM, NFV, LEN (longueur moyenne d'entrenœuds) et TAL ont présenté des corrélations positives simultanément avec le grain et la biomasse. Ceci indique qu'il est possible de combiner simultanément des niveaux élevés de rendements en grains et en biomasses paille chez un même génotype. Des résultats similaires ont été rapportés par différents auteurs (Ross *et al.*, 1983 ; Blummel *et al.*, 2009 ; Reddy *et al.*, 2005).

L'étude des plasticités phénotypiques des différents caractères étudiés a mis en évidence que celles-ci étaient bien différentes selon les caractères (figure 12). Or il est important de souligner que la plasticité et les interactions génotype-environnement ont traditionnellement été perçues comme des obstacles à la création de génotypes à phénotype constant dans des environnements variés (Bloomfield *et al.*, 2014; Sadras *et al.*, 2009). Ainsi, une robustesse phénotypique importante, c'est-à-dire une plasticité phénotypique réduite, était une cible pour la sélection (Makumburage et Stapleton, 2011 ; Semchenko et Zobel, 2005). Conformément à cette affirmation, les caractères fortement associés au rendement biomasse paille, à savoir DSF, NFA, PMG et NFV, ont été peu plastiques dans notre gamme d'environnements, avec respectivement des valeurs de plasticité de 12 %, 12,3 %, 15,6 % et 16 %. Il en a été de même pour les caractères LAFD et LOFD associés au rendement grains, qui ont montré des plasticités phénotypiques respectives de 13 % et 15 %. Cela indique leur capacité à répondre positivement à la sélection à différents environnements en favorisant soit la biomasse soit le grain par l'élévation de leur valeur. Bello *et al.* (2007) ont signalé un faible effet environnemental pour le NGP, DSF et NFA sur le sorgho. Ces résultats sont du même type que ceux de Dornbusch *et al.* (2011) et Kumar *et al.* (2016) sur le riz. La faible plasticité de la DSF pourrait s'expliquer dans notre étude par le fait que nous avons l'environnement comme une combinaison « site x dates de semis x années ».

L'étude a montré aussi que d'autres caractères très bénéfiques pour le grain et la biomasse se sont révélés très plastiques c'est-à-dire influencés par notre gamme d'environnements. Cela a pour conséquence pour la sélection qu'elle ne pourra agir que faiblement sur ces caractères au début du processus de sélection mais aussi qu'elle devra procéder par la suite à une large évaluation multi-environnementale pour l'identification d'environnements cibles favorisant ces caractères (tableau 7). Ainsi, les caractères nombre de grains par panicule (NGP ; 37 %) et nombre de talles (TAL ; 124 %) associés au rendement grains (RDTG), se sont mieux exprimés respectivement dans les environnements de Sinthiou Malem en 2013 (S13D1), 2014 en date 1 (S14D1) et 2016 (S16D1) pour NGP et en S14D1 et S16D1 pour TAL. Ces 4 environnements ont été caractérisés par une fertilité globale très bonne (en 2016) à relativement bonne (2013 et 2014), une absence de maladie et une pluviométrie globalement satisfaisante. La forte plasticité phénotypique constatée du TAL confirme que ce caractère est l'un des principaux caractères plastiques des céréales comme le sorgho qui dans des conditions défavorables développent des talles axillaires pour ajuster le rendement en grains (Kim *et al.*, 2010a). Les caractères LAI (38 %), HP (27 %) et LEN (39 %), tous bénéfiques à la production de biomasse, se sont également mieux exprimés dans ces environnements (tableau 7). De même le caractère DIAM (22,5%), favorable au double usage, s'est mieux exprimé en S13D1, et également en B13D1.

D'une manière générale, les caractères plastiques s'expriment mieux dans les environnements favorables sur le plan agropédoclimatique comme l'ont été S16D1, S13D1, S13D2 et S14D1, et pour les caractères relatifs à la production de biomasse surtout quand la date de semis est normale. Nous avons pu associer les plasticités des caractères aux variations des rendements, ce qui nous a montré qu'un rendement en grains élevé est associé avec une bonne plasticité du LAI et du SLA, alors qu'un rendement stable est plus fortement associé à des LEN et NGP très peu plastiques (stables). Ainsi, plus NGP et LEN varient fortement en fonction de l'environnement, plus le rendement grain sera variable et potentiellement faible en général. D'un autre côté des FT, DIAM, NFV et LEN peu plastiques contribuent à un rendement en biomasse stable, alors que la plasticité de NFA, NFV, LOFD et LEN favorise un rendement en biomasse élevé (figure 13). Concernant le double usage, les plasticités des caractères qui lui sont fortement associés tels que TAL, DIAM, LEN et NVF, vont contribuer à une double production élevée pour des environnements donnés.

Tableau 7: Valeurs moyennes des caractères plastiques selon les environnements.

Essai	Caractère						
	NGP	BMF	LEN	TAL	HP	LAI	DIAM
S16D1	1833	1157	9,8	0,5	249	3,1	-
S13D1	1688	699	9,8	0,3	229	2,8	2
S14D1	1420	924	9,2	1,2	223	-	1,7
S13D2	1788	617	10,6	0,2	223	3,2	1,7
S15D2	1125	705	6,3	0,1	189	1,5	1,2
B13D1	1144	798	7,2	0,5	189	2,7	1,9
N15D1	1157	576	8,5	0,2	187	2	1,6
N15D2	1258	816	6,8	0,2	164	1,9	1,8
S14D2	1549	508	7,6	0,2	136	-	1,8
S15D1	1323	587	5,2	0,3	131	1	1,1
B13D2	752	507	5,4	0,6	121	1,9	1,8

NGP=nombre de grain par panicule ; BMF= biomasse sèche à la floraison ; LEN=longueur moyen entrenœud ; TAL=nombre de talle ; HP : hauteur plante ; LAI =indice de surface foliaire ; DIAM= diamètre de la tige.

3.6 Conclusion

L'étude a révélé trois types de production : des plantes type pour la biomasse (IS15401 et SK5912) avec des valeurs élevées pour DSF, LAI, NFV, LEN et DIAM ; des plantes type pour le grain (621B, F2-20 et Soumba) présentant des NGP et LAFD élevés ; et enfin des plantes type à double production (Fadda, Nieleni, et Pablo) combinant des caractères favorables pour le grain et la biomasse et révélant la possibilité de sélectionner des génotypes de sorgho à forte capacité pour la double production. Ainsi, des rendements en biomasse paille et en grain élevés associés à certains caractères souhaitables (photosensibilité, longueur entrenœud, surface foliaire et nombre et taille organes élevés, durée cycle) pourraient être incorporés dans un seul génotype de sorgho, comme le suggèrent les associations favorables présentées dans cette étude.

Il en ressort de cette étude qu'une forte plasticité phénotypique des caractères souhaitables complique fortement le travail du sélectionneur qui doit multiplier ses expérimentations à la recherche d'environnements où ces caractères s'expriment le mieux. De plus, un rendement élevé et stable en grains est apparu comme étant associé à une taille de feuille drapeau stable, de phénologie stable et de nombre de grains par panicule stable et celui en biomasse paille à une stabilité du diamètre de la tige.

Afin de faire des recommandations pour le choix des variétés à concevoir ou introduire, un modèle dynamique de simulation de culture est nécessaire pour (i) reproduire la plasticité phénotypique des caractères d'intérêt potentiel et (ii) explorer avec un jeu de données climatiques historiques les combinaisons optimales de paramètres génotypiques de sorgho pour la définition d'idéotypes pouvant orienter les critères de sélection dans nos environnements cibles.

Chapitre 4 : Evaluation du modèle de culture SAMARA pour la prise en compte de la plasticité phénotypique de géotypes de sorgho au Sénégal

4.1 Résumé

Le besoin social et économique reconnu d'augmenter la production mondiale du sorgho dans ces différentes composantes malgré des ressources terrestres et hydriques limitées et des aléas climatiques qui augmentent, justifie des concepts innovants en matière de sélection des nouveaux génotypes avec des schémas théoriques pour de tels génotypes incluant une plasticité phénotypique adaptative des traits dépendante de l'environnement. Les modèles dynamiques de cultures sont des outils qui peuvent aider à appréhender cette plasticité phénotypique. L'objectif de cette étude est d'évaluer la capacité de SAMARA à simuler la plasticité phénotypique de génotypes de sorgho, en termes de phénologie, de dynamique morphologique et de composantes du rendement qui en découlent. Les données d'expérimentation collectées à Nioro du Rip en 2015 et Sinthiou Malem de 2013 à 2016 sur dix génotypes de sorghos contrastés au Sénégal ont été utilisées. SAMARA a été capable de simuler la plasticité phénotypique de la phénologie avec des erreurs de prédiction (RRMSE = 2,8 – 9 %) comprises dans la gamme de variation des erreurs d'observation (CV= 0 - 9,1 %). Les résultats ont montré aussi à l'évaluation que SAMARA a été en mesure de reproduire les plasticités phénotypiques du développement des feuilles (RMAE entre 3,5 % et 16,3 %) et des dynamiques des biomasses par rapport aux données de terrain avec des estimations d'erreur minimales sur divers environnements. La simulation de la plasticité phénotypique des rendements en grains et des nombres de grains par panicule à travers les environnements ont été globalement peu satisfaisants avec des erreurs de prédiction (RRMSE) non comprises dans la gamme de variation des erreurs d'observation (CV) pour la plupart des génotypes. De plus, SAMARA a tendance à surestimer les rendements en biomasse paille pour la plupart des génotypes probablement dû au non prise en compte de la sénescence terminale des feuilles responsables de la photosynthèse qui est dépendante de la fourniture d'azote non prise en compte dans la structure de SAMARA. Ainsi, l'absence d'aucune disposition actuelle dans le modèle SAMARA pour simuler la dynamique de l'azote (N) dans la culture peut donc limiter les compétences prédictives du modèle pour la plasticité phénotypique dans des conditions limitées en N, conditions qui sont fréquentes en Afrique de l'Ouest.

Mots clés : SAMARA, plasticité phénotypique, calibration, évaluation, biomasse et grains

4.2 Introduction

Le sorgho est une importante céréale des zones arides et semi-arides en Afrique de l'Ouest où il est utilisé dans l'alimentation humaine et animale (Belton and Taylor, 2004). Sa sensibilité à la photopériode qui permet l'ajustement de son cycle à la longueur de la saison des pluies favorise son adaptation aux différents environnements de culture dans cette zone (Sanon *et al.*, 2014). Il gagne de plus en plus en importance au Sénégal en raison de sa capacité à assurer plusieurs productions (grain, biomasse de la tige et des feuilles et le jus sucré de la tige) pour des usages d'alimentation animale, humaine et également industriels parmi lesquels la production de bioéthanol, de bioproduits, de bière et de provendes (Prakasham *et al.*, 2014).

Mais le besoin social et économique reconnu d'augmenter la production mondiale du sorgho dans ces différentes composantes malgré des ressources terrestres et hydriques limitées et des aléas climatiques qui augmentent, justifie des concepts innovants en matière de sélection. En effet, les techniques conventionnelles d'amélioration des cultures ont favorisé la sélection sur le rendement en occultant les traits morphologiques et physiologiques - traits pourtant souvent plus faciles à évaluer que le rendement en soi. La prise en compte de ces traits et de leurs relations avec le rendement, dans le processus de sélection, peut constituer un gain dans la conception de génotypes performants et stables. En effet, au-delà du défi de relever le plafond des performances génétique et physiologique, ces nouveaux génotypes doivent également montrer des adaptations nécessaires pour produire des résultats stables face à la variabilité et aux changements climatiques, à différentes gestions des cultures et aux risques combinés de ces facteurs (Rötter *et al.*, 2015). Ainsi, les schémas théoriques pour de tels génotypes ne devraient pas être basés sur une vision d'idéotype statique mais inclure une plasticité phénotypique adaptative des traits dépendante de l'environnement. En effet, les plantes utilisent la plasticité phénotypique (Schlichting, 1986, 2002) pour orienter le déploiement et la croissance des organes vers des ressources variables, en les aidant à équilibrer les relations source-puits (Donald, 1963, 1968, Bradshaw, 1965).

Donald (1968) a inventé le terme « idéotypes » pour décrire les types de plantes optimaux (pour des conditions données). Il a défini les idéotypes comme des « plantes ayant des caractéristiques modèles connues pour influencer la photosynthèse, la croissance et (dans les céréales) le rendement en grains ». Fondamentalement, la définition d'idéotype implique (i) la définition d'un environnement de production de cultures, (ii) la conception d'un modèle végétal à partir de

caractères morphologiques et physiologiques connus pour influencer la performance dans cet environnement, et (iii) la combinaison de ces caractères dans un type de plante.

Puisque les concepts d'idéotype spécifient typiquement le nombre d'organes, la taille et la géométrie, les modèles de culture conventionnels qui ne sont pas assez détaillés sur la phénologie et l'architecture de la plante ne sont pas adaptés pour tester ou améliorer de tels concepts. Ils ne peuvent pas non plus appréhender la plasticité phénotypique qui déterminerait en fin de compte si une modification morphologique pourrait être bénéfique pour le rendement et dans quelles conditions. Dingkuhn *et al.* (2005) ont proposé des concepts pour rendre compte de la plasticité phénotypique des traits structuraux, constituant les puits et les sources, dans des environnements variables. Cela nécessite de simuler le déploiement des organes, leur dimensionnement.

Des modèles de fonction et de structure des plantes (FSPM) ont ainsi été développés pour simuler des topologies d'organes arborescents, combinés à des modèles simples d'acquisition de biomasse (Yan *et al.*, 2004 et Vos *et al.*, 2010). Parmi eux le FSPM EcoMeristem (Luquet *et al.*, 2006) simule la plasticité de la taille des organes et leur taux de déploiement en utilisant des relations « sources-puits » et la concurrence entre les puits et pools d'assimilation. Suivant un plan de corps topologique, la morphologie réelle de la plante est alors une propriété émergente régie par des ressources et des règles de développement. EcoMeristem a été utilisé pour phénotyper de façon heuristique la diversité génétique (Luquet *et al.*, 2012) et explorer les combinaisons de caractères pour des plantes hypothétiques (Luquet *et al.*, 2016). De tels concepts, cependant, n'ont pas été mis en œuvre dans des modèles de culture ayant des compétences agronomiques complètes, pour prédire par exemple les phénotypes selon le génotype, l'environnement et la gestion de la culture (Kumar *et al.*, 2016).

Ainsi, cette étude a pour but de modéliser la plasticité phénotypique, en termes de phénologie, de dynamique morphologique et de composantes du rendement qui en découlent pour dix génotypes de sorghos contrastés au Sénégal en utilisant le modèle SAMARA. Ce modèle, dont les concepts de modélisation ont été développés à l'origine pour les céréales dans le modèle EcoMeristem (Luquet *et al.*, 2006) et dans le modèle EcoPalm pour le palmier à huile (Combres *et al.*, 2013), a été simplifié en simulant des organes comme des cohortes à l'échelle de la population végétale, tout en conservant les détails architecturaux tels que la taille des organes et leurs nombres.

4.3 Matériel et Méthodes

4.3.1 Sites expérimentaux

Les travaux de modélisation (calibration et évaluation) se sont appuyés sur les données issues de 11 essais menés lors des saisons des pluies 2013, 2014, 2015 et 2016 en trois stations de recherche de l'Institut Sénégalais de Recherches Agricoles (ISRA), à savoir les stations de Sinthiou Malem (en 2013, 2014, 2015 et 2016), Bambey (en 2013) et Nioro du Rip (en 2015) (tableau 8). Les principales caractéristiques de ces essais (type de sol, date de semis, données climatiques journalières standards - températures minimales, maximales et moyennes, humidités relatives minimales, maximales et moyennes, radiations globales, vitesses moyennes du vent à 2 m du sol et hauteurs des pluies) qui ont servi comme entrées pour le modèle ont été présentés aux chapitres 2 et 3. Sur ces essais, les observations relatives aux dates de floraison et maturité, aux nombres de feuilles apparues, aux indices de surface foliaire (LAI), aux dynamiques des biomasses et des hauteurs de plante, aux rendements (grain et biomasse) et composantes de rendement, ont été utilisées pour la calibration et l'évaluation du modèle. Les biomasses aériennes totales et leur répartition entre les tiges, feuilles et panicules, les LAI et les nombres de feuilles apparues ont été suivis de façon hebdomadaire en 2013 et 2014 et tous les 12 jours en 2015 et 2016 jusqu'à 10 jours après la floraison. Les détails méthodologiques sont décrits dans les chapitres 2 et 3.

4.3.2 Choix des sites pour calibration et évaluation

La calibration d'un modèle doit en principe être réalisée à partir de données provenant d'essais conduits dans des situations agronomiques bien maîtrisées afin que ces données ne soient pas affectées par des facteurs (par exemple des maladies et mauvaises herbes) non pris en compte par le modèle. Ensuite il faut évaluer la calibration du modèle : cette évaluation doit être réalisée à partir de données différentes et indépendantes de celles de la calibration et provenant d'essais réalisés si possible aussi dans de bonnes conditions agronomiques. Ainsi, les données des trois essais conduits en 2014 et 2016 à Sinthiou Malem (S14D1, S14D2 et S16D1) ont été utilisées pour le calibrage de la phénologie, de la dynamique des biomasses et hauteurs des plantes, du nombre de feuilles apparues et des rendements finaux. Le LAI a été uniquement calibré sur l'essai S16D1 du fait d'une part de l'absence de données de LAI en 2014 mais aussi parce que S16D1 a été le meilleur essai de toutes nos expérimentations et donc les données de LAI sont supposées être les meilleures (chapitre 2). En plus de leurs bonnes conditions agronomiques,

S14D1 et S14D2 présentait un décalage de 20 jours entre leur date de semis, ce qui est important pour la calibration de la phénologie.

L'évaluation du modèle a été faite avec les essais menés en 2013 et 2015 à Sinthiou Malem (S13D1, S13D2 et S15D2) et en 2015 à Nioro du Rip (N15D2). Ces essais ont eu des conditions agronomiques relativement bonnes (absence de maladies pour S13D1 et S13D2 ; et moindre pour S15D2 et N15D2 ; fertilité globale plus ou moins bonne ; voir chapitres 2 et 3). Les essais S13D1 et S13D2 ont été utilisés pour l'évaluation de l'ensemble des paramètres d'observation alors que S15D2 et N15D2 ont été utilisés uniquement pour la phénologie et les rendements et composantes. En effet, sur ces essais les mesures dynamiques avaient été abandonnées.

Les autres essais, en l'occurrence B13D1, B13D2 (Bambey 2013), S15D1 (Sinthiou Malem 2015) et N15D1 (Nioro du Rip 2015) n'ont pas été utilisés, ni pour la calibration ni pour l'évaluation, à cause de leurs mauvaises conditions agronomiques (ces essais ont souffert de stress hydrique, de maladies et on y a constaté beaucoup d'hétérogénéités ; chapitre 2 et 3).

Tableau 8 : Liste des essais utilisés pour la calibration et l'évaluation du modèle.

Essai	Zone	Code	Type sol*	Date semis	Précédent culturale	Calibration	Evaluation
Semis 1/ 2013	BBY	B13D1	Sableux	17/07/2013	Jachère		
Semis 2/2013	BBY	B13D2	Sableux	31/07/2013	Jachère		
Semis 1/ 2013	SIN	S13D1	Sablo-limoneux	25/07/2013	Jachère		1
Semis 2/ 2013	SIN	S13D2	Sablo-limoneux	06/08/2013	Jachère		1
Semis 1/ 2014	SIN	S14D1	Sableux	17/07/2014	Arachide	1	
Semis 2/ 2014	SIN	S14D2	Sableux	06/08/2014	Arachide	1	
Semis 1/ 2015	SIN	S15D1	Sableux	09/07/2015	Arachide		
Semis 2/2015	SIN	S15D2	Sableux	08/08/2015	Arachide		1
Semis 1/ 2015	SIN	S16D1	Sablo-limoneux	25/07/2016	Jachère	1	
Semis 1/ 2015	NIO	N15D1	Sableux	16/07/2015	Niébé		
Semis 2/ 2015	NIO	N15D2	Sablo-limoneux	13/08/2015	Jachère		1

BBY: Bambey, SIN: Sinthiou Malem, NIO: Nioro du Rip

4.3.3 Description du modèle de culture

Le modèle SAMARA (*Simulator of crop trait Assembly, Management Response and Adaptation*) a été initialement implémenté sur la plateforme EcoTrop (programmée en langage Delphi, Kouressy *et al.*, 2008), une plateforme de développement et de simulations de modèles. Cette plateforme intègre une série d'outils et d'interfaces : une bibliothèque de modules de simulation, un moteur de simulation, une interface utilisateur avec sorties graphiques et numériques, des scénarios de simulation exécutables en masse, une base de données pour les données observées et simulées, etc. Une description et un code source commenté du modèle ainsi que la définition de tous les paramètres (relatifs à la culture, à la parcelle, au sol et aux pratiques culturales) et de toutes les variables d'entrée et de sortie sont consultables sur <http://umr-agap.cirad.fr/en/equipes-scientifiques/modele-SAMARA>. Seuls les principes et processus pertinents à cette étude sont décrits ici. Pour cette étude, nous avons utilisé une version qui a été recodée sous R version 3.2 (R Development Core Team, 2015) pour faciliter le lien avec des logiciels d'optimisation des paramètres et devenir plus flexible au sein de la communauté de développeurs.

SAMARA est un modèle de culture déterministe. Son objectif est de simuler la croissance de monocotylédones de type céréale tropicale, et concerne actuellement le riz et le sorgho. SAMARA simule, selon la radiation, la température, l'eau et le CO₂, la croissance et le rendement des céréales à l'échelle de la canopée au pas de temps journalier. Le modèle utilise en données d'entrée les données météorologiques standards journalières (le rayonnement solaire ou éventuellement l'insolation, les températures minimales et maximales, la vitesse moyenne du vent, les humidités relatives minimales et maximales, les évapotranspirations potentielles (FAO) et les précipitations). Les propriétés hydrodynamiques du sol (teneurs en eau volumiques au point de flétrissement, à la capacité au champ et à la saturation, etc.) et les itinéraires techniques (surtout date et densité de semis) servent aussi comme données d'entrée au modèle. Des concepts simples et décrits par Kouressy *et al.* (2008) et Heinemann *et al.* (2008) sont utilisés pour simuler le gain de biomasse selon l'approche à grandes feuilles « Big-Leaf », la loi de Lambert-Beer pour l'interception du rayonnement photosynthétiquement actif (PAR) et l'efficacité d'utilisation du rayonnement (RUE ; *radiation use efficiency* en anglais) pour l'assimilation du carbone.

Le modèle SAMARA est différent des autres modèles de cultures à l'échelle agronomique (parcelles) dans la façon dont il traite la répartition de la biomasse sur la base de la compétition entre les organes, pour un seul pool d'assimilation, ce qui implique en particulier qu'il gère plus de détails sur la morphologie et la phénologie de la plante. En effet, le développement de la plante est simulé à partir de règles de fonctionnement des méristèmes qui initient et prédimensionnent des organes (puits) en fonction des ressources disponibles (sources). Le statut de la plante est exprimé par l'Indice Interne de Compétition (I_c) qui est une variable d'état correspondant au rapport entre la production d'assimilats (apports) et la somme des puits (demandes) générées par la croissance de la plante. L' I_c permet de représenter en une seule variable d'état les effets des différentes contraintes environnementales autrement que par un effet additif, et d'en tenir compte à l'échelle des organes pour simuler le fonctionnement structural et architectural de la plante. Dans ce modèle, la variable d'état I_c mesure quotidiennement la situation source-puits et renvoie une information de régulation aux différents processus morphogénétiques et physiologiques que sont le stockage ou la mobilisation de réserve, l'initiation ou la sénescence des tiges, la taille et sénescence des feuilles, l'élongation des entre-nœuds, la croissance des racines et le dimensionnement pré-floral des panicules. Une demande accrue d'assimilats dans le cadre d'une forte densité de semis peut provoquer une réduction du tallage, de la hauteur de plante, des tailles des feuilles et de la panicule. Il peut arriver que les assimilats ne puissent pas être entièrement utilisés faute de puits et de stockage, ce qui entraîne une inhibition de la photosynthèse par rétroaction, ce qui réduit effectivement l'efficacité d'utilisation du rayonnement (RUE). Il peut également arriver que le développement du puits soit excessif (par exemple, tallage abondant), provoquant beaucoup de sénescence et également une réduction de RUE. De tels effets d'encombrement ne peuvent pas être bien simulés avec des modèles de culture ayant des modalités de partitionnement et de sénescence fixes (Dingkuhn *et al.*, 2007).

Ce concept, adapté du modèle EcoMeristem (Luquet *et al.*, 2006, 2007, 2012), s'écarte donc du schéma classique de partitionnement « prescriptif » qui suppose une RUE constante en l'absence d'une contrainte hydrique, minérale (par exemple stress azoté) ou phytosanitaire liée à l'environnement. SAMARA permet donc de simuler une plasticité phénotypique, adaptative ou non, et de simuler différentes stratégies d'adaptation comme par exemple une utilisation agressive ou au contraire plus conservatrice des ressources. Selon SAMARA, la croissance et le potentiel de rendement d'un génotype ne sont donc pas seulement fonction du potentiel de photosynthèse et de l'interception de la lumière (source), mais aussi de la dynamique et de la

réactivité des ressources du processus morphogénétique lui-même (demande). De plus le modèle prend en compte, les contraintes hydrique et thermique, la submersion, mais pas (encore) la nutrition minérale ni les attaques des parasites (Dingkuhn *et al.*, 2013).

En plus de cette spécificité de régulation du partitionnement de la biomasse via l'Ic (commune au modèle EcoMeristem, Luquet *et al.* 2006), SAMARA se différencie des autres modèles de culture par sa manière de simuler le SLA (surface foliaire spécifique) et sa capacité à prioriser certains processus. En effet, le SLA est simulé, dans SAMARA, en fonction du rang du phytomère pour les nouvelles feuilles alors que les feuilles existantes conservent leur SLA structural jusqu'à ce qu'elles soient sénescentes. Par conséquent, le SLA global (moyen) de la canopée dépend du stade de développement, de la proportion de jeunes feuilles et de la sénescence plus ou moins rapide des feuilles. Par ailleurs l'utilisateur peut attribuer un niveau de priorité pour le développement pré-floral de la panicule en fonction des assimilats présents dans la plante et du niveau de stress de la plante. La taille (taille potentielle) du puits de la panicule dans SAMARA est proportionnelle à la masse structurale pré-florale de la panicule, mais elle est réduite si les contraintes thermiques ou de sécheresse causent la stérilité de l'épillet.

La phénologie est simulée, comme dans la plupart des modèles de culture, sur la base essentiellement du temps thermique cumulé, et le cycle de la plante est divisé en six (6) phases depuis le semis jusqu'à la maturité physiologique qui sont : la phase du semis à la levée (SDJLevee), la phase végétative (SDJBVP), la phase sensible à la photopériode (SDJPSP), la phase reproductive (RPR), la phase de remplissage du grain (SDJMATU1) jusqu'à la phase de dessiccation (SDJMATU2). La précocité d'un génotype donné dépend essentiellement de SDJBVP et de SDJPSP car les autres phases varient relativement entre les génotypes. La longueur de la phase SDJPSP dépend de la photopériode selon une approche de modélisation déjà appliquée dans le modèle SARRAH (Kouressy *et al.*, 2008) largement utilisé pour les sorghos d'Afrique de l'Ouest. Le phyllochron est considéré comme génotypique et constant (valeur de référence) au cours du cycle du développement végétatif mais il peut cependant augmenter un peu par rapport à sa valeur de référence au cours de la phase végétative selon un coefficient défini par l'utilisateur, ce en référence aux observations de Clerget *et al.* (2008). A noter que l'initiation de la panicule est indépendante du rang du phytomère.

4.3.4 Calibration du modèle

4.3.4.1 Etapes de calibration et choix des paramètres

Le calibrage des paramètres génotypiques du modèle SAMARA a été effectué sur sa dernière version (SAMARA_2.3) fonctionnant avec le logiciel R (package SAMARA_2.3). Trois étapes ont été suivies :

- ✚ la définition des règles de paramétrage pour les différents paramètres génotypiques : (a) la fixation à leur valeur par défaut de certains paramètres dont on sait qu'ils varient très peu au sein de l'espèce ; (b) le choix des paramètres à optimiser et la définition de leurs valeurs minimales et maximales selon les génotypes (sur la base du chapitre 3) ;
- ✚ le calage manuel de la phénologie afin d'avoir des cycles et des phases simulées dont les durées sont comparables à celles observées dans la réalité, ce en l'absence de toutes contraintes dont en particulier hydriques ;
- ✚ l'optimisation automatique par le modèle du LAI, des dynamiques de la biomasse et hauteur plante, du nombre de feuilles apparues et du rendement et ses composantes.

Le choix des paramètres génotypiques à calibrer a été fait sur la base de leur sensibilité sur la phénologie, l'expansion de la plante, les biomasses et rendements et composantes dont leur choix a été dérivé des caractères plastiques qui ont été identifiés dans le chapitre 3. Au total, 16 paramètres génotypiques ont été considérés. Parmi eux les paramètres servant à la calibration de la phénologie sont au nombre de quatre : la durée en degré jour la plus courte entre la levée et l'initiation paniculaire (SDJBVP), la durée en degré jour entre l'initiation paniculaire et la floraison (SDJPRP), la durée en degré jour entre la floraison et la fin du remplissage du grain (SDJMATU1) et le coefficient de sensibilité à la photopériode (PPSens). Douze autres paramètres ont été utilisés pour la calibration par optimisation directe par le modèle de la dynamique des biomasses, de la hauteur de la plante, du LAI, du nombre de feuilles apparues et des rendements et composantes : le phyllochrone (Phyllo), la surface foliaire spécifique minimale (SlaMin), les longueur et largeur maximales du limbe (LeafLengthMax et CoeffLeafWLRatio), la longueur maximale de l'entrenœud (InternodeLengthMax), la capacité variétale au tallage (TilAbility), le taux de sénescence des feuilles (CoeffLeafDeath), celui d'avortement des talles (CoeffTillerDeath), la masse structurale des entrenœuds par unité de longueur (CoeffInternodeMass), le taux de croissance structurale des panicules (CoeffPanicleMass), la masse structurale maximale de la panicule (PanStructMassMax) et la masse de grain qui peut être produite par la masse structurale de la panicule (CoeffPanSinkPop).

Avant le paramétrage du modèle, des valeurs moyennes de référence selon les génotypes ont été déterminées pour SDJBVP et SDJMATU1 sur la base des données observées durant les expérimentations. Ces valeurs de référence sont données initialement au modèle. Des valeurs de référence d'autres paramètres parmi les 12 servant à l'optimisation directe par le modèle ont aussi été calculées à partir des données observées afin de servir au calcul des valeurs minimales et maximales pour l'optimisation directe: Phyllo (rapport entre la somme en degré jour entre l'émergence et la floraison et le nombre de feuilles), LeafLengthMax (observée), CoeffLeafWLRatio (rapport entre les largeur et longueur maximales des feuilles), InternodeLengthMax (rapport entre hauteur maximale et nombre maximum de feuilles produites) et SlaMin (méthode de calcul expliquée au chapitre 3). Pour les autres paramètres, leurs valeurs par défaut selon les dix génotypes de sorgho étudiés ont été utilisées. Ainsi, pour l'optimisation directe, une variation de 10 % en moins et/ou en plus, correspondant respectivement aux valeurs minimales et maximales, a été considérée pour tous les paramètres à l'exception des paramètres CoeffInternodeMass et CoeffPanSinkPop pour lesquels on a considéré des variations de respectivement $\pm 75\%$ et $\pm 50\%$ car ces deux paramètres se sont révélés très plastiques (chapitre 3). Les valeurs des paramètres génotypiques calculées selon les génotypes sont présentées en annexe 4.

L'étape de calage manuel de la phénologie a consisté à ajuster les paramètres SDJBVP, SDJMATU1, SDJPRP et PPSens afin de rendre compte au mieux des durées semis-floraison et semis-maturité observées. PPSens varie, en général, entre des valeurs de 0,2 et 1,2, et plus la valeur est élevée, moins le génotype est sensible à la photopériode.

Enfin l'optimisation directe par le modèle de la dynamique des biomasses, de la hauteur de la plante, du LAI, du nombre de feuilles apparues et des rendements et composantes a été faite sur les 12 paramètres pour l'optimisation directe décrits plus haut. Ces paramètres sont hautement interactifs car ils affectent I_c et sont dépendants des processus de tallage, d'expansion des organes et de sénescence. Ils ont des fonctions distinctes et ne sont donc pas redondants, mais affectent l'effet de chacun sur les variables d'état. Ils ne peuvent donc pas être paramétrés indépendamment les uns des autres. Les valeurs par défaut du modèle et les valeurs minimales et maximales calculées de ces paramètres génotypiques utilisés pour la calibration et les processus qu'ils gouvernent au niveau de la plante sont répertoriées dans le tableau 9. La procédure d'optimisation est décrite plus en détail dans la section suivante.

Tableau 9 : Description des paramètres génotypiques du modèle choisis pour la calibration des dix génotypes de sorgho étudiés.

Processus	Paramètre modèle	Définition	unité	Valeur par défaut	Valeur minimale	Valeur maximale
Phénologie	SDJBVP*	Durée la plus courte entre la levée et l'initiation paniculaire	°Cj	400	303	591
	SDJMATU1*	Durée entre la floraison et la fin du remplissage du grain	°Cj	400	321	446
	SDJRPR	Durée entre l'initiation paniculaire et la floraison	°Cj			
	Phyllo*	Durée entre l'apparition successive de deux feuilles sur le brin maître	°Cj	50	26	45
	PPSens	Coefficient de sensibilité à la photopériode		0,4	0,2	3
Expansion de la plante	InternodeLengthMax*	Longueur individuelle maximale de l'entre-nœud	mm	200	63	500
	LeafLengthMax*	Longueur individuelle maximale du limbe la plus longue	mm	800	758	1324
	CoeffLeafWLRatio*	Largeur maximale du limbe de la feuille en tant que fraction de la longueur	mm/mm	0,08	0,09	0,15
	CoeffLeafDeath	Coefficient de sensibilité à la mort des feuilles à la restriction des ressources, fonction de l'indice Ic	fraction	0,03	0,0009	0,033
	TilAbility	Règle la capacité de l'installation des talles	-	0,2	0,01	0,24
	Slamin*	Valeur finale minimale de la surface massique des feuilles	Kg.ha ⁻¹	0,0018	0,00086	0,00264
	CoeffTillerDeath	Taux d'avortement des talles (en fraction du nombre existant)	fraction	0,2	0,18	0,22
Biomasse	CoeffInternodeMass	Masse structurale maximale de l'entrenœud par mm de longueur	g.mm ⁻¹	0,01	0,005	0,14
Rendement	CoeffPanicleMass	Taux de croissance des parties structurales de la panicule entre l'IP et la floraison	fraction	0,1	0,1	0,3
	PanStructMassMax	Limite supérieure de la masse de la panicule individuelle (parties structurales, y compris le pédoncule).	g	3	6	13,5
	CoeffPanSinkPop	Proportion de la masse de grain (rendement) qui peut être produite par la masse structurale de la panicule, y compris le pédoncule	fraction	10	4	12

*paramètres calculés sur la base des données expérimentales pour chaque génotype (ici on présente les valeurs minimales et maximales tous génotypes confondus). Les valeurs de la SDJRPR sont celles fournies par le modèle.

4.3.4.2 Procédure d'optimisation

L'algorithme d'optimisation globale par évolution différentielle DEoptim (package du logiciel R) a été utilisé pour calibrer les paramètres relatifs à la morphologie de la plante et la dynamique des biomasses. La fonction DEoptim du package DEoptim recherche les minima de la fonction objective, c'est-à-dire de l'erreur du modèle, en faisant varier les paramètres à optimiser entre leurs limites inférieure et supérieure. Dans cette étude, la fonction objective qui a été définie (P) est la somme de l'ensemble des erreurs du modèle entre les valeurs observées et les valeurs qu'il a prédites : à savoir la somme (a) des erreurs quadratiques moyennes relatives (RRMSE) sur les observations finales (les rendements grain et biomasse et le nombre de grains par panicule) et (b) des erreurs absolues moyennes relatives (RMAE) sur les observations dynamiques (hauteur de la plante, biomasses, nombre de feuilles produites et indice de surface foliaire LAI), selon la formule suivante :

$$P = \sum(RMAE_{observations\ dynamiques} + RRMSE_{observations\ finales}) \quad (\text{Eq. 4.1})$$

Par conséquent, dans l'appel à DEoptim, nous avons spécifié des vecteurs qui comprenaient les valeurs minimales et maximales des paramètres génotypiques à optimiser (Tableau 9). Si le jeu de données de calibration est suffisamment varié, il n'y a qu'une seule solution optimale aux valeurs des paramètres, mais elle ne peut être approximée que par un processus itératif. Dans notre étude, nous avons considéré un nombre d'itérations de 500, déterminé après les toutes premières explorations car correspondant aux nombres d'itérations à partir duquel la plupart de nos paramètres génotypiques n'évoluaient plus.

4.3.5 Evaluation du modèle

Pour évaluer la performance du modèle, c'est-à-dire pour évaluer la pertinence des valeurs des paramètres déterminées par la calibration, il faut faire fonctionner le modèle dans des situations n'ayant pas servi à la calibration (Tableau 8) et comparer les données observées aux résultats simulés par le modèle pour ces situations. Les écarts entre les valeurs prédites et les valeurs observées ont été appréciés à travers des représentations graphiques combinées à des statistiques quantitatives (Bouman and van Laar, 2006 ; Timsina *et al.*, 2008; Feng *et al.*, 2007).

Les paramètres statistiques retenus sont la valeur de la racine de l'erreur quadratique moyenne relative (RRMSE) pour les observations finales et l'erreur absolue moyenne relative (RMAE) pour les observations dynamiques. La RRMSE est exprimée en pourcentage (%). Un modèle ayant une bonne performance a des valeurs de RRMSE et de RMAE qui tendent vers 0 %. Pour

le RMAE, nous avons considéré que 0,3 (30 %) était acceptable (Mayer et Bulter, 1993) alors que pour la RRMSE, nous avons considéré qu'elle devait être inférieure ou du même ordre que l'erreur d'observation donnée par le coefficient de variation (CV). Les coefficients de variation (Eq. 4.4) ont été calculés sur les essais d'évaluation en tenant compte des répétitions.

$$RRMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{n}} \cdot \frac{100}{\bar{O}} \quad (\text{Eq 4.2})$$

$$rMAE = \frac{(\sum |S_i - O_i|) / n}{\bar{O}} \cdot 100 \quad (\text{Eq 4.3})$$

$$CV = \frac{(\frac{\sum (O_i - M)^2}{n})^{0,5}}{\bar{O}} \cdot 100 \quad (\text{Eq 4.4})$$

Où S_i = valeur simulée, O_i = valeur observée, \bar{O} = moyenne des valeurs observées et n = nombre de situations considérées.

4.4 Résultats

Les paramètres génotypiques ont été ajustés à partir des données expérimentales obtenues pour les dix génotypes de sorgho étudiés sur nos environnements d'étude choisis pour la calibration. Les paramètres les plus variables, et donc représentant le plus de plasticité phénotypique, sont CoeffInternodeMass, TilAbility, InternodeLengthMax et SlaMin (Tableau 10). Ces paramètres sont spécifiques de la morphologie de la plante et régulent la taille, le nombre et l'épaisseur de la tige, ainsi que l'épaisseur de la feuille.

Pour la suite, pour faciliter la lecture, nous présenterons les résultats de calibration et évaluation par processus physiologique, et nous ne les détaillerons de façon approfondie que pour les trois génotypes les plus contrastés : d'une part pour 621B, génotype à cycle précoce et ciblé pour la production de grain ; d'autre part pour Fadda, génotype hybride à cycle intermédiaire et à potentiel pour le double usage ; et enfin pour IS15401, génotype à cycle long et taille haute produisant beaucoup de biomasse. Cependant tous les résultats pour l'ensemble des génotypes se trouvent aux annexes 5, 6, 7 et 8.

Tableau 10 : Paramètres génotypiques calibrés pour les dix génotypes étudiés.

Génotype	SDJ BVP	SDJ RPR	SDJ MATU1	Psens	Phyllo	Internode Length Max	Leaf Length Max	Coeff Leaf WLRatio	SlaMin	Coeff Leaf Death	Til Ability	Coeff Tiller Death	Coeff Internode Mass	Coeff Panicle Mass	Pan Struct Mass Max	Coeff Pan Sink Pop
Fadda	300	350	345	0,8	32	500	775	0,08	0,0009	0,011	0,16	0,216	0,139	0,30	8,1	6,1
Nieleni	420	300	300	0,8	34	196	966	0,11	0,0016	0,0054	0,047	0,21	0,063	0,25	11,3	8,6
IS15401	350	300	386	0,56	29	300	848	0,07	0,0009	0,0187	0,24	0,18	0,058	0,30	10,3	5,6
Pablo	300	300	350	0,8	32	500	767	0,08	0,0013	0,011	0,04	0,22	0,022	0,22	11,0	5,6
CSM63E	250	300	360	1	30	214	821	0,08	0,0026	0,0281	0,012	0,184	0,022	0,14	6,3	6,9
SK5912	450	400	400	0,57	26	70	874	0,09	0,0008	0,022	0,009	0,22	0,02	0,12	6,3	3,2
Grinkan	350	400	320	0,91	28	60	700	0,09	0,0016	0,027	0,01	0,18	0,046	0,23	4,8	4,6
Soumba	350	350	320	0,9	31	156	738	0,09	0,001	0,0302	0,031	0,22	0,06	0,23	7,2	6,3
621B	250	400	300	1,1	29	80	758	0,12	0,0012	0,0011	0,18	0,22	0,005	0,15	9,4	5,0
F2-20	350	350	350	0,9	29	196	756	0,1	0,0014	0,0007	0,22	0,22	0,02	0,15	12,0	7,3
Moyenne	337	345	343	0,8	30	227,2	800,3	0,09	0,0013	0,0155	0,095	0,207	0,046	0,21	8,7	5,9
CV (%)	19,3	12,7	9,8	20,4	7,7	71,2	9,8	17,0	41,1	72,2	98,8	8,7	85,0	31,5	28,5	25,3

4.4.1 Phénologie

4.4.1.1 Calibration

Au cours du processus de calibration, la durée entre le semis et la levée a été considérée comme constante pour tous les génotypes avec un paramètre $SDJLevee$ dont la valeur a été fixée à 50 °Cj, ce qui correspond à une levée environ 3 jours après semis. La durée de la phase reproductive (SDRPR) a peu varié à travers les génotypes avec des valeurs comprises entre 300 °Cj et 400 °Cj. Les durées des phases végétative (SDJBVP) et photosensibles (SDJPSP) ont par contre varié de façon conséquente. Ainsi, la SDJBVP a varié entre 250 °Cj et 450 °Cj en fonction des génotypes. Pour la SDJPSP, le coefficient de sensibilité à la photopériode (PPSens) a varié entre 0,56 à 1,1. Les génotypes CSM63E et 621B, les plus précoces et les moins sensibles à la photopériode, ont eu des SDJBVP de 250 °Cj et des PPSens respectifs de 1 et 1,1, alors que les génotypes les plus tardifs SK5912 et IS15401 ont eu des valeurs de SDJBVP les plus élevées et des PPSens les plus faibles, soit respectivement 450 °Cj et 420 °Cj d'une part et 0,56 et 0,57 d'autre part (tableau 10).

4.4.1.2 Evaluation

Ces différentes valeurs de paramètre ont permis d'obtenir une prédiction du modèle SAMARA globalement satisfaisante des durées semis-floraison et semis-maturité sur les quatre environnements utilisés pour l'évaluation. En moyenne, les écarts entre dates simulées et observées ont été très faibles avec des erreurs de prédiction (RRMSE) de 8 % et 6,6 % respectivement pour les durées semis-floraison et semis-maturité (soit 6 à 5 jours de différence). Ces erreurs de prédiction (RRMSE) sont dans la plupart des cas comprises dans l'erreur d'observation (CV). On note cependant des situations pour lesquelles les écarts entre dates simulées et observées sont élevés, notamment pour le génotype 621B avec des RRMSE respectives de 13,6 % et 15,8 % pour les durées semis-floraison et semis-maturité qui sont en particulier sous-estimées en date 2 de semis (N15D2 et S15D2) (figure 14). D'une manière générale, la prédiction des durées semis-floraison et semis-maturité a été meilleure pour les autres génotypes, surtout pour les génotypes IS15401 et SK5912 qui sont les plus tardifs, avec des valeurs de RRMSE comprises entre 2,8 % et 6,4 % (tableau 11 et annexe 5). En somme, la reproduction de la phénologie par le modèle est satisfaisante.

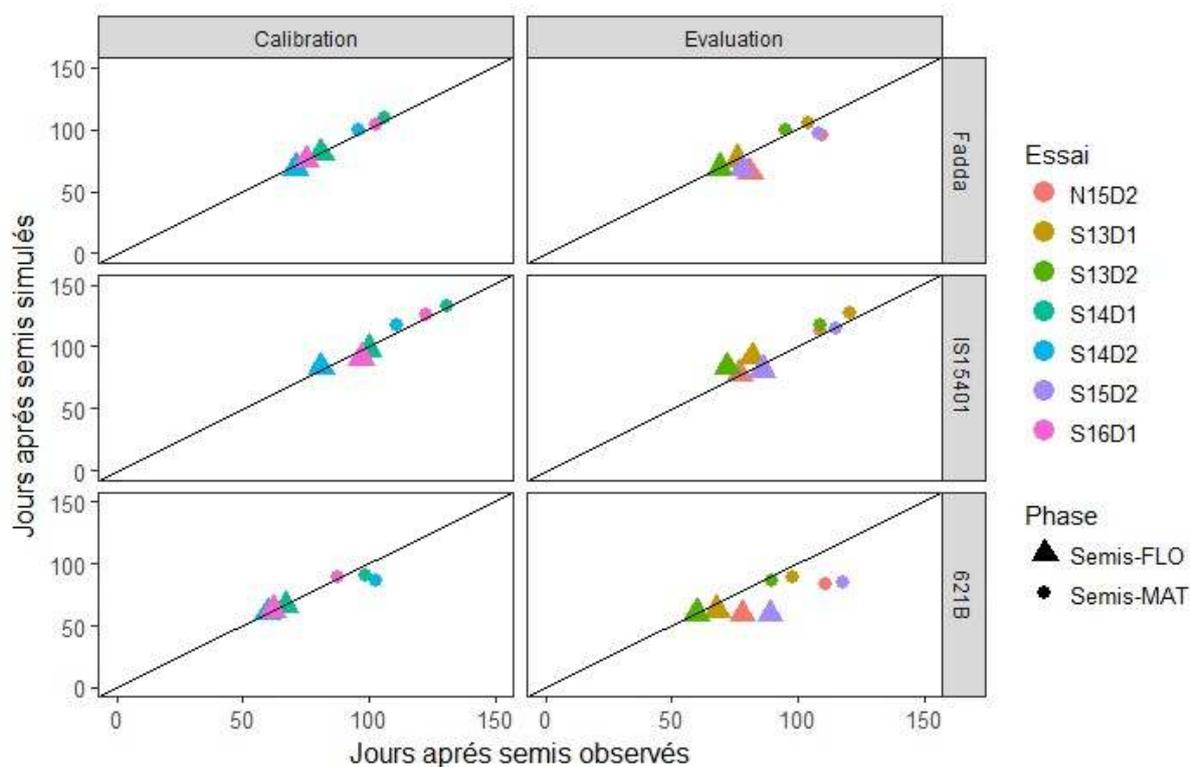


Figure 14: Résultats de la calibration-évaluation des phénologies des trois génotypes les plus contrastés.

Tableau 11: Indice de performance de l'évaluation du modèle pour les durées semis-floraison et semis-maturité pour les dix génotypes étudiés.

Génotype	RRMSE (en %)		CV (en %)	
	Durée SFLO	Durée SMAT	Durée SFLO	Durée SMAT
Fadda	7,7	5,9	0 – 2,1	0 – 1,0
IS15401	6,4	3,3	0 – 5,5	0 – 4,3
621B	15,8	13,6	0 – 8,1	0 – 6,4
Nieleni	4,6	6,9	0 – 4,7	0 – 2,1
Pablo	8,9	6,5	0 – 5,5	0 – 2,8
CSM63E	9,0	7,2	0 – 1,7	0
SK5912	3,8	2,8	0 – 9,1	0 – 8,7
Grinkan	6,4	5,7	0 – 8,0	0 – 3,7
Soumba	7,3	6,5	0 – 4,9	0 – 2,5
F2-20	9,9	7,5	0 – 5,3	0 – 3,0

RRMSE=erreur quadratique moyenne relative ; Durée SFLO = durée semis-floraison ; Durée SMAT = durée semis-maturité.

4.4.2 Morphologie : Hauteur de la plante, nombre de feuilles et indice de surface foliaire

4.4.2.1 Calibration

Pour la calibration du modèle en ce qui concerne la morphologie de la plante, les paramètres relatifs à l'expansion de la plante ont été ajustés pour confondre les valeurs simulées à celles observées pour la hauteur de la plante, le nombre de feuilles produites et l'indice de surface de foliaire (LAI).

Le phyllochrone (Phyllo) a varié entre 29 °Cj et 34 °Cj selon les génotypes (tableau 10). La plus faible valeur a été obtenue avec le génotype le plus tardif et le plus productif en termes de feuilles, à savoir SK5912, alors que les plus grandes valeurs ont été notées pour Nieleni et Pablo qui ont produit en moyenne 22 et 23 feuilles respectivement (chapitre 3).

La longueur maximale de l'entre-nœud (InternodeLengthMax) a reproduit les caractéristiques des génotypes de grandes tailles et ceux à tailles courtes avec des valeurs comprises entre 500 mm et 60 mm (tableau 10). Les valeurs les plus élevées ont été trouvées chez les génotypes à grandes tailles Pablo, IS15401 et Fadda avec respectivement 500 mm, 300 mm et 500 mm. La plus faible valeur – 60 mm – a été obtenue avec Grinkan qui est le génotype le plus court.

La longueur et la largeur maximale des feuilles (LeafLengthMax et CoeffLeafWLRatio) ont varié selon les génotypes entre respectivement 700 mm et 966 mm d'une part et entre 0,07 mm.mm⁻¹ et 0,12 mm.mm⁻¹ d'autre part. Les valeurs de LeafLengthMax les plus élevées ont été enregistrées pour les génotypes à feuilles longues qui sont Nieleni, SK5912 et IS15401 alors que Grinkan à feuilles de taille courte a obtenu la valeur la plus faible.

Le caractère variétal « stay-green » simulé à travers le coefficient de mortalité des feuilles (CoeffLeafDeath) est fortement lié aux génotypes avec des valeurs variant de 0,0007 à 0,0302 (tableau 10). Nieleni a obtenu la valeur la plus faible alors que la valeur la plus élevée s'est retrouvée chez Soumba.

La capacité de tallage (TilAbility) a également nettement distingué les génotypes de type *guinea* à fort tallage et *caudatum* à tallage faible avec des valeurs variant entre 0,24 pour IS15401 et 0,009 pour SK5912 (tableau 10). Le paramètre SlaMin déterminant l'épaisseur des feuilles a varié de 0,0009 chez IS15401 à 0,0026 chez CSM63E, indiquant que ce dernier a des feuilles plus minces alors que celles du premier sont épaisses.

4.4.2.2 Evaluation

Ces paramètres ont permis de bien reproduire les dynamiques de croissance en hauteur des plantes dans les essais d'évaluation avec des valeurs de la statistique d'erreur RMAE inférieures à 30 % (tableau 12), à l'exception du cas du génotype 621B (RMAE de 50 %) pour lequel il a été noté une sur-estimation des hauteurs, particulièrement pour S13D1 (figure 15).

Les simulations ont également bien rendu compte des nombres de feuilles produites des essais d'évaluation avec un bon ajustement du phyllochrone donnant des RMAE variant entre 4,2 % et 16,3 % (tableau 16). Les meilleurs ajustements ont été obtenus avec les génotypes Pablo, Nieleni, Fadda et F2-20 avec des valeurs de RMAE respectives de 3,5 %, 4,2 %, 6,3 % et 7,5 % (figure 16 et annexe 6).

Pour l'indice de surface foliaire (LAI) les paramètres retenus ont conduit à des ajustements très variables puisque les RMAE sont comprises entre 14,3 % et 80 %. Le modèle a mal simulé le LAI pour la plupart des génotypes (RMAE supérieures à 30 %) à l'exception des génotypes Fadda, IS15401, Pablo et Grinkan pour lesquels les résultats sont satisfaisants avec des RMAE respectives de 29,2 %, 14,3 %, 16,8 % et 21,7 %. D'une manière générale le modèle a eu tendance à sur-estimer le LAI (figure 17 et annexe 6). La sénescence des feuilles pourrait ne pas être correctement simulée par SAMARA.

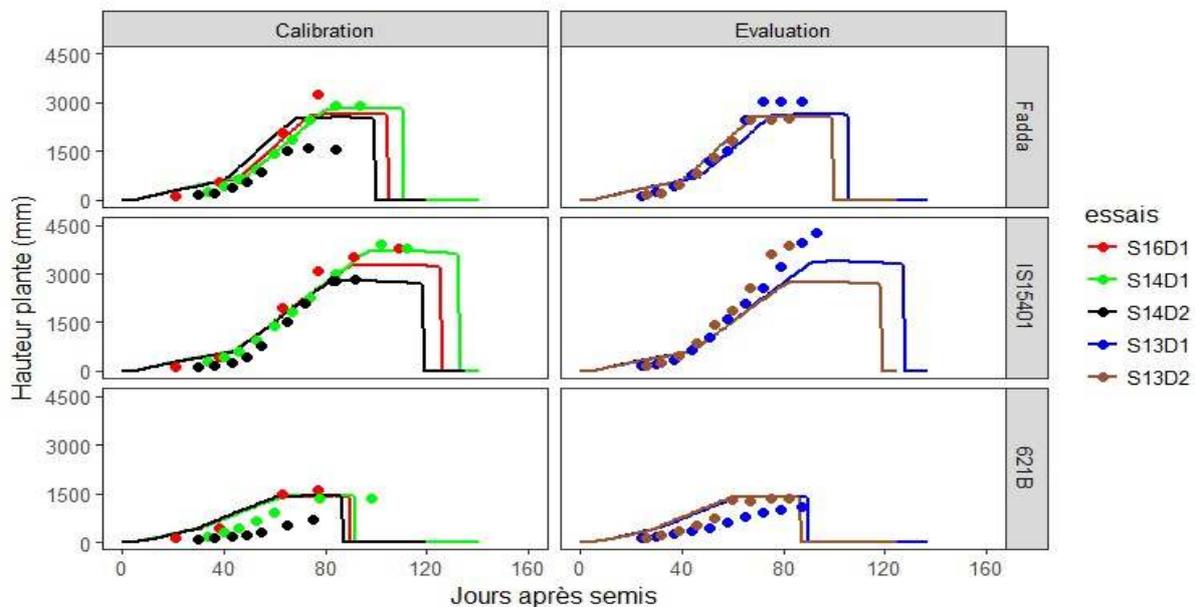


Figure 15 : Résultats de la calibration- évaluation de la hauteur de la plante pour les trois génotypes les plus contrastés. Les points représentent les valeurs observées et les lignes continues les valeurs simulées.

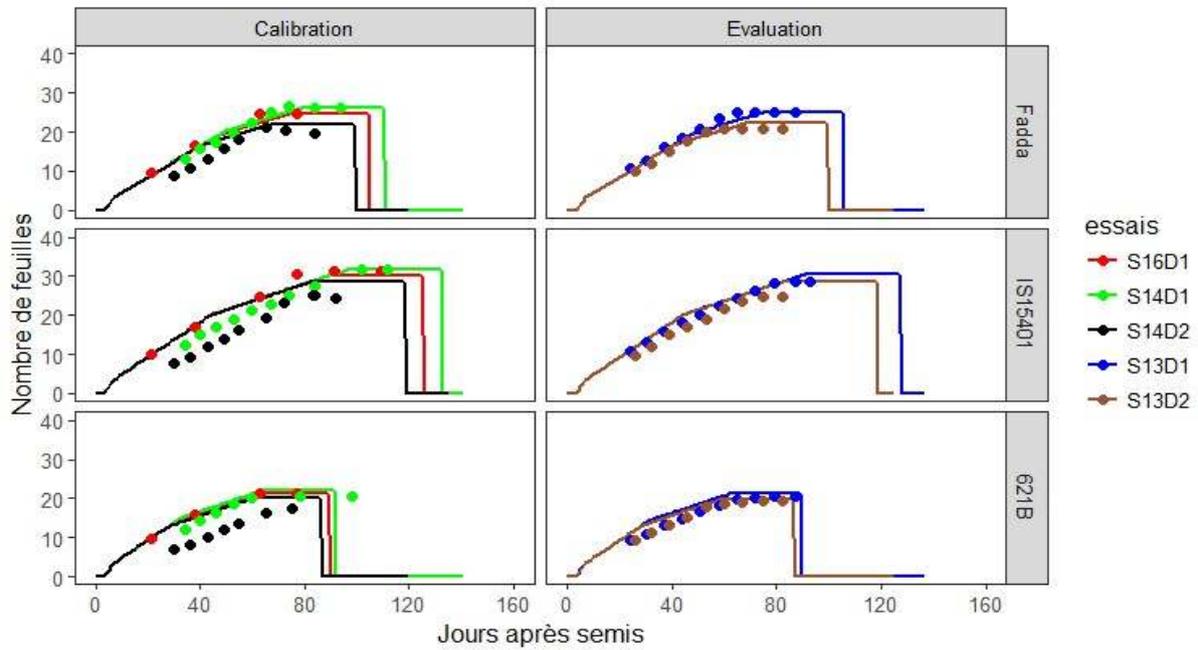


Figure 16 : Résultats de la calibration- évaluation du nombre de feuilles apparues pour les trois géotypes les plus contrastés. Les points représentent les valeurs observées et les lignes continues les valeurs simulées.

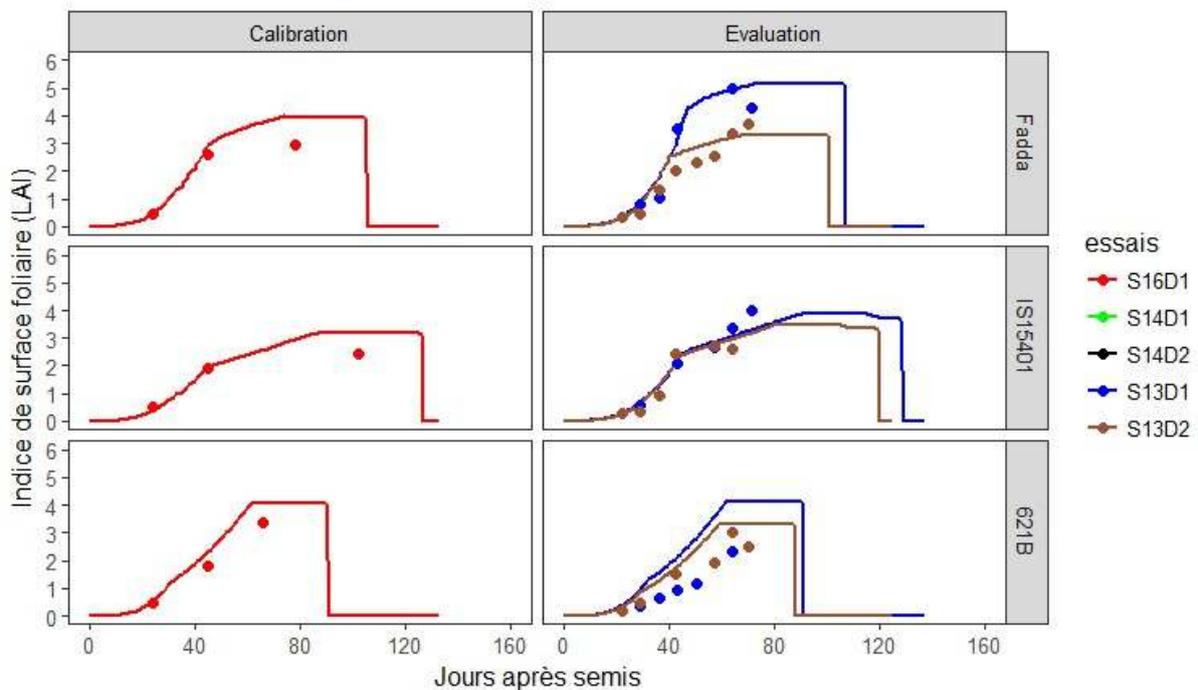


Figure 17: Résultats de la calibration- évaluation du LAI de la plante pour les trois géotypes les plus contrastés. Les points représentent les valeurs observées et les lignes continues les valeurs simulées.

Tableau 12: Indice de performance de l'évaluation du modèle pour la hauteur de la plante, le nombre de feuilles apparues et le LAI pour les dix génotypes étudiés.

Génotype	RMAE (en %)		
	Hauteur plante	Feuilles apparues	LAI
Fadda	20,6	6,3	29,2
IS15401	22,1	8,4	14,3
621B	49,7	10,4	62,3
Nieleni	17,0	4,2	80,0
Pablo	21,8	3,5	16,8
CSM63E	18,2	8,4	32,3
SK5912	26,1	16,3	51,1
Grinkan	30,6	11,1	21,7
Soumba	22,3	12,1	31,6
F2-20	27,3	7,5	67,3

RMAE= (*relative Mean Absolute Error*) : Erreur absolue moyenne

4.4.3 Dynamique des biomasses

4.4.3.1 Calibration

Les paramètres relatifs à la production de biomasses ont fait l'objet d'ajustement pour la calibration du modèle afin de mieux rapprocher les valeurs de biomasses (biomasses feuille, tige et totale à savoir feuille, tige et panicule) simulées à celles observées. Le paramètre relatif à la masse structurale des entre-nœuds (CoeffInternodeMass) a varié entre 0,005 g.mm⁻¹ et 0,139 g.mm⁻¹ (tableau 10). Les génotypes CSM63E, 621B et Pablo ont obtenu les valeurs les plus faibles avec respectivement 0,022 g.mm⁻¹, 0,005 g.mm⁻¹ et 0,022 g.mm⁻¹. Les plus grandes valeurs ont été enregistrées pour Fadda, Nieleni, IS15401 et Grinkan, génotypes à tiges épaisses (chapitre 2), avec respectivement 0,139 g.mm⁻¹, 0,063 g.mm⁻¹, 0,058 g.mm⁻¹ et 0,046 g.mm⁻¹. Les calibrations des autres paramètres, à savoir le Phyllo, l'InternodeLengthMax, le CoeffLeafDeath et SlaMin, qui régulent aussi les biomasses, surtout les biomasses feuille, ont été décrites plus haut.

4.4.3.2 Evaluation

Ces paramètres ont permis d'avoir une évaluation du modèle globalement satisfaisante pour la biomasse feuille. Pour la plupart des génotypes étudiés, les sorties du modèle SAMARA ont été proches des valeurs observées avec des valeurs de RMAE inférieures à 30 %, surtout chez les génotypes IS15401, Pablo, CSM63E et Soumba pour lesquels les RMAE variant entre 11,1 % et 22,9 %. En revanche, il a été noté des valeurs de RMAE élevées, variant entre 122 % et 50 %, pour les génotypes SK5912, Nieleni, F2-20 et 621B qui ont tous montré aussi des

valeurs élevées de RMAE pour le LAI (tableaux 12 et 13). Pour ces trois génotypes il a été noté une sur-estimation de la biomasse feuilles en S13D1, surtout pour Fadda et 621B (figure 18 et annexe 7).

Pour la biomasse tige, l'évaluation a donné des résultats globalement peu satisfaisants avec des RMAE comprises entre 26,5 % et 123 % (tableau 4-6). Le modèle a tendance à sur-estimer la biomasse tige dans les essais d'évaluation, surtout en S13D1 pour l'ensemble des génotypes (figure 19). En ce qui concerne la biomasse totale, il a été aussi noté des valeurs de RMAE élevées comprises entre 43 % et 81 % à cause de la sur-estimation des tiges par le modèle (tiges incluses dans la biomasse totale) (tableau 13). Comme pour la biomasse tige, les biomasses totales des génotypes ont tendance à être sur-estimées par le modèle sur l'ensemble des essais d'évaluation (figure 20 et annexe 7).

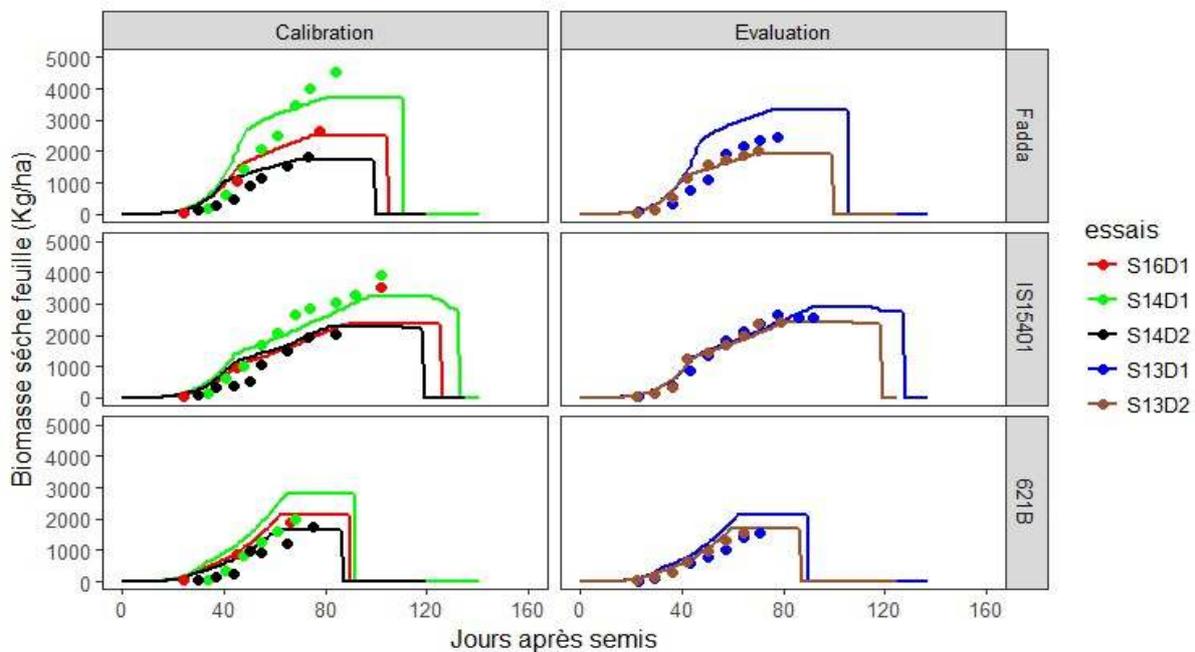


Figure 18 : Résultats de la calibration-évaluation de la biomasse feuille pour les trois génotypes les plus contrastés. Les points représentent les valeurs observées et les lignes continues les valeurs simulées.

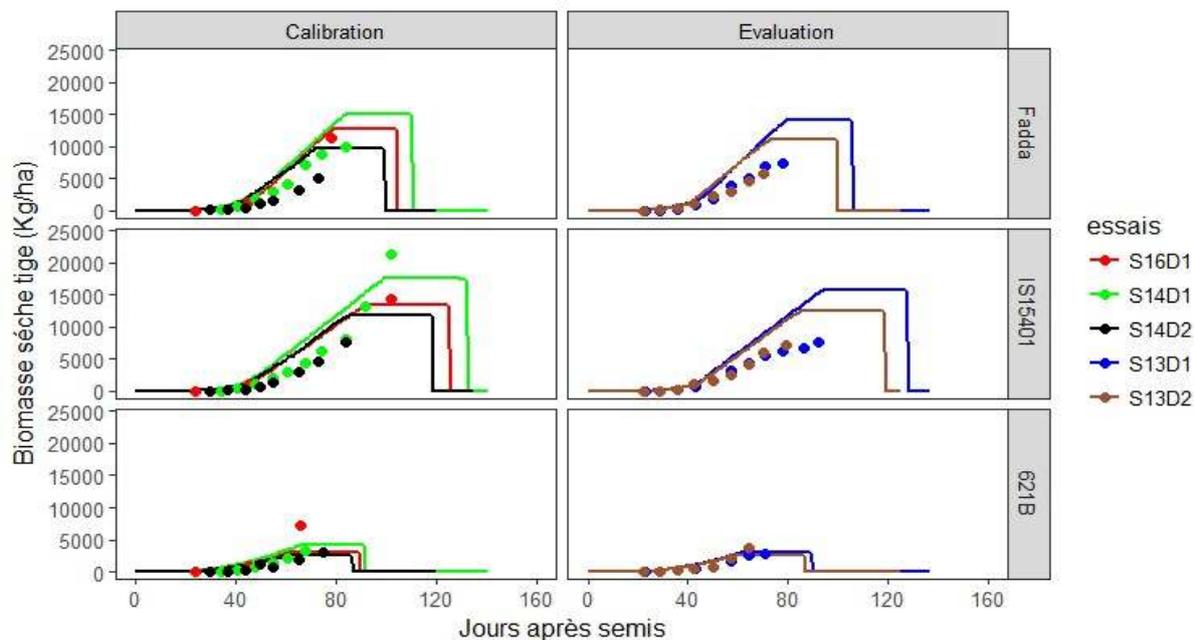


Figure 19 : Résultats de la calibration- évaluation de la biomasse tige pour les trois géotypes les plus contrastés. Les points représentent les valeurs observées et les lignes continues les valeurs simulées.

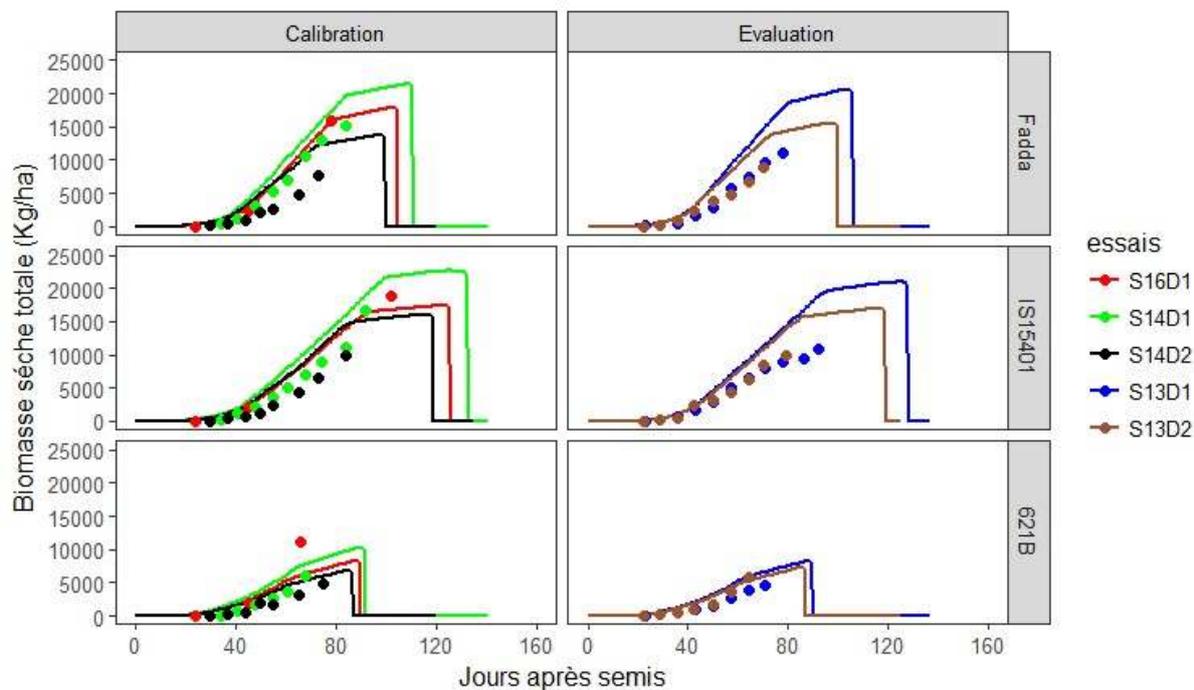


Figure 20 : Résultats de la calibration-évaluation de la biomasse totale pour les trois géotypes les plus contrastés. Les points représentent les valeurs observées et les lignes continues les valeurs simulées.

Tableau 13 : Indice de performance de l'évaluation du modèle des biomasses feuille, tige et totale pour les dix géotypes étudiés.

Géotype	RMAE (en %)		
	Biomasse feuille	Biomasse tige	Biomasse totale
Fadda	31,5	71,0	62,0
IS15401	11,1	71,8	43,5
621B	37,5	48,2	53,6
Nieleni	122,0	99,0	118,0
Pablo	21,7	64,8	45,7
CSM63E	19,9	123,0	85,0
SK5912	83,7	80,1	81,2
Grinkan	34,0	26,5	12,7
Soumba	22,9	76,2	44,2
F2-20	49,6	89,0	77,6

RMAE= (*relative Mean Absolute Error*) : Erreur absolue moyenne

4.4.4 Rendements grain et biomasse paille et ses composantes

4.4.4.1 Calibration

Pour la calibration des rendements en grain et en biomasse paille et des composante du rendement en grain, on a travaillé sur les trois paramètres relatifs au rendement qui sont (i) le taux de croissance des parties structurales de la panicule entre IP et floraison (CoeffPaniculeMass), (ii) la masse structurale maximale de la panicule (y compris pédoncule) (PanStructMassMax), et (iii) la proportion de la masse de grain qui peut être produite par masse structurale de panicule (CoeffPanSinkPop), pour rendre compte au mieux des données observées. Les valeurs de CoeffPaniculeMass ont varié entre 0,12 et 0,30 pour des valeurs de PanStructMassMax comprises entre 4,8 g et 12 g, et des valeurs de CoeffPanSinkPop allant de 3,2 à 8,6 (tableau 10). Le modèle a reproduit les caractéristiques des géotypes à haut rendement et à grosses panicules et celles des géotypes à faible rendement et à masse paniculaire faible. Ainsi, les géotypes performants pour la double production et à grosses panicules Fadda, Nieleni et Pablo ont obtenu les plus grandes valeurs de CoeffPaniculeMass, à savoir 0,30, 0,25 et 0,22 respectivement, pour des PanStructMassMax respectives de 8,1 g, 11,3 g et 10,3 g. En plus, Fadda, Nieleni et Pablo font partie des géotypes à CoeffPanSinkPop élevés. Les plus faibles valeurs du CoeffPaniculeMass ont été enregistrées pour les géotypes SK5912, CSM63E qui sont peu productifs (chapitre 2), avec respectivement 0,12 et 0,14. Enfin SK5912, le géotype le plus tardif, a eu la valeur de CoeffPanSinkPop la plus faible, égale à 3,2 (tableau 10).

4.4.4.2 Evaluation

Ces paramètres génotypiques ont permis d'obtenir pour le rendement en grain des résultats avec des valeurs de la statistique d'erreur estimée (RRMSE) variant entre 8,1 % et 43,8 % (tableau 14) pour des valeurs de la statistique d'erreur d'observation (CV) comprises entre 2 % et 43% pour les géotypes Fadda, IS15401, Pablo, CSM63E et Grinkan. Pour les autres géotypes, surtout les *caudatum* Nieleni, SK5912, 621B, Soumba et F2-20, on a obtenu des RRMSE très élevées (entre 64,1 % et 92 %) non comprises dans la statistique d'erreur d'observation (entre 4,9 % et 40,0 %). Ces géotypes, à l'exception de Nieleni, avaient donné des rendements en grains très variables, particulièrement pour 621B, d'un environnement à l'autre. En plus on peut constater pour ces géotypes une sur-estimation du rendement par le modèle dans tous les environnements d'évaluation (figure 21 et annexe 8). D'une manière générale, le modèle a donc tendance à simuler pour les *guinea* des rendements qui varient beaucoup moins entre les environnements que ce que l'on observe dans la réalité, et à sur-estimer les rendements *des caudatum*.

Pour le rendement en biomasse paille, les évaluations sont globalement acceptables pour 621B, Grinkan, Pablo, CSM63E, Grinkan avec des valeurs de RRMSE variant entre 11,4 % et 47,5 % alors que les erreurs d'observation vont de 5,9 % à 62,3 %. Pour les autres géotypes les rendements en biomasse paille ont été mal simulés par le modèle avec des RRMSE variant entre 65,4 % et 89 % pour des erreurs d'observation comprises entre 5,9 % et 67,4 %. D'une manière générale le modèle a tendance à sur-estimer le rendement en biomasse paille surtout pour les *guinea* alors que pour les *caudatum* il a tendance à les sous-estimer (figure 22 et annexe 8).

Pour le nombre de grains par panicule, on note pour l'évaluation des valeurs de la statistique d'erreur comprises dans l'erreur d'observation (13,4 % et 46,4 % contre 5,2 % et 65,1 % respectivement) à l'exception du cas du géotype 621B (valeur de RRMSE de 42,8 % contre 15,2 % pour le coefficient de variation) (tableau 14). Le modèle a tendance à sous-estimer le nombre de grains par panicule dans la plupart des environnements d'évaluation (Figure 23 et annexe 8).

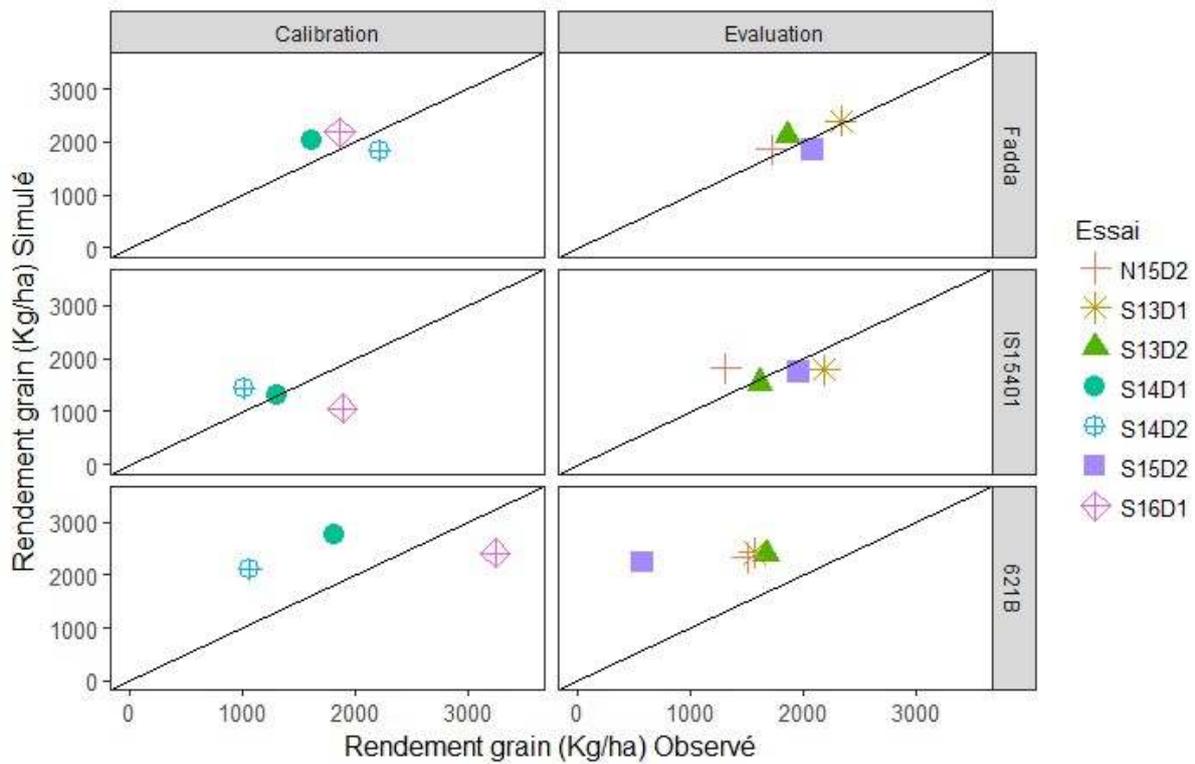


Figure 21 : Résultats du processus de calibration-évaluation du rendement en grain pour les trois génotypes contrastés étudiés.

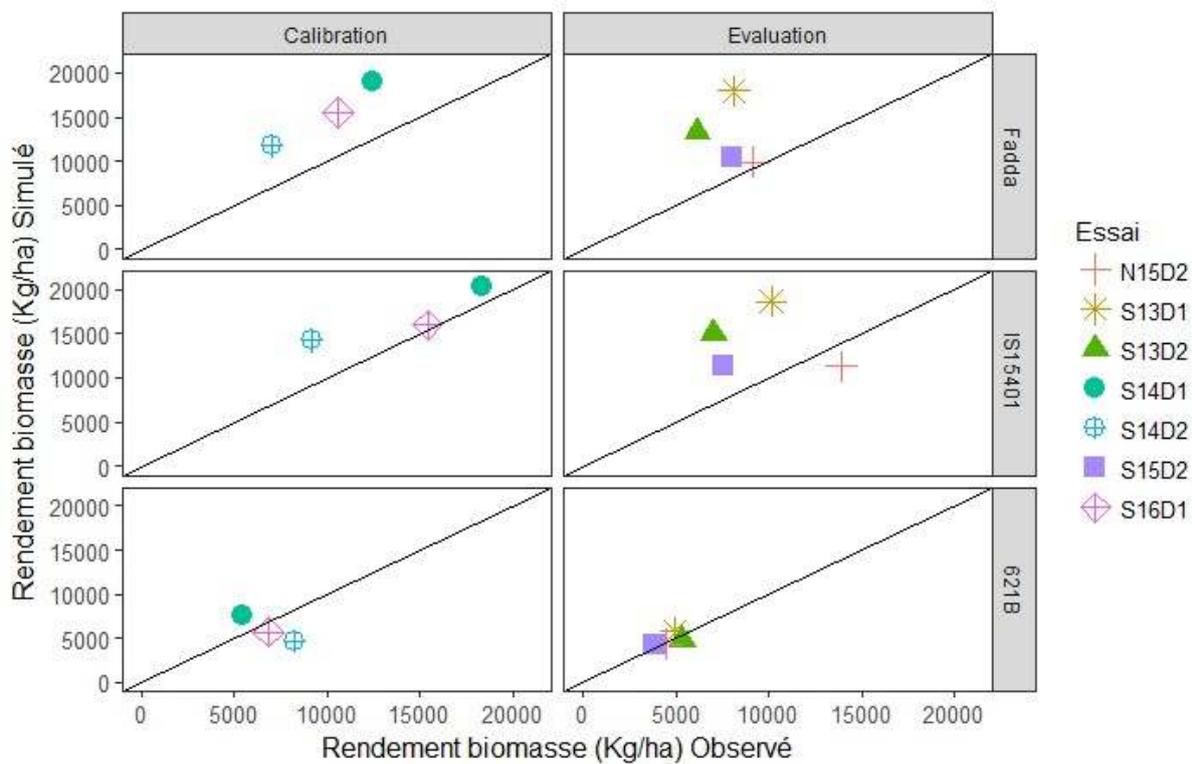


Figure 22 : Résultats du processus de calibration-évaluation du rendement en biomasse paille pour les trois génotypes contrastés étudiés.

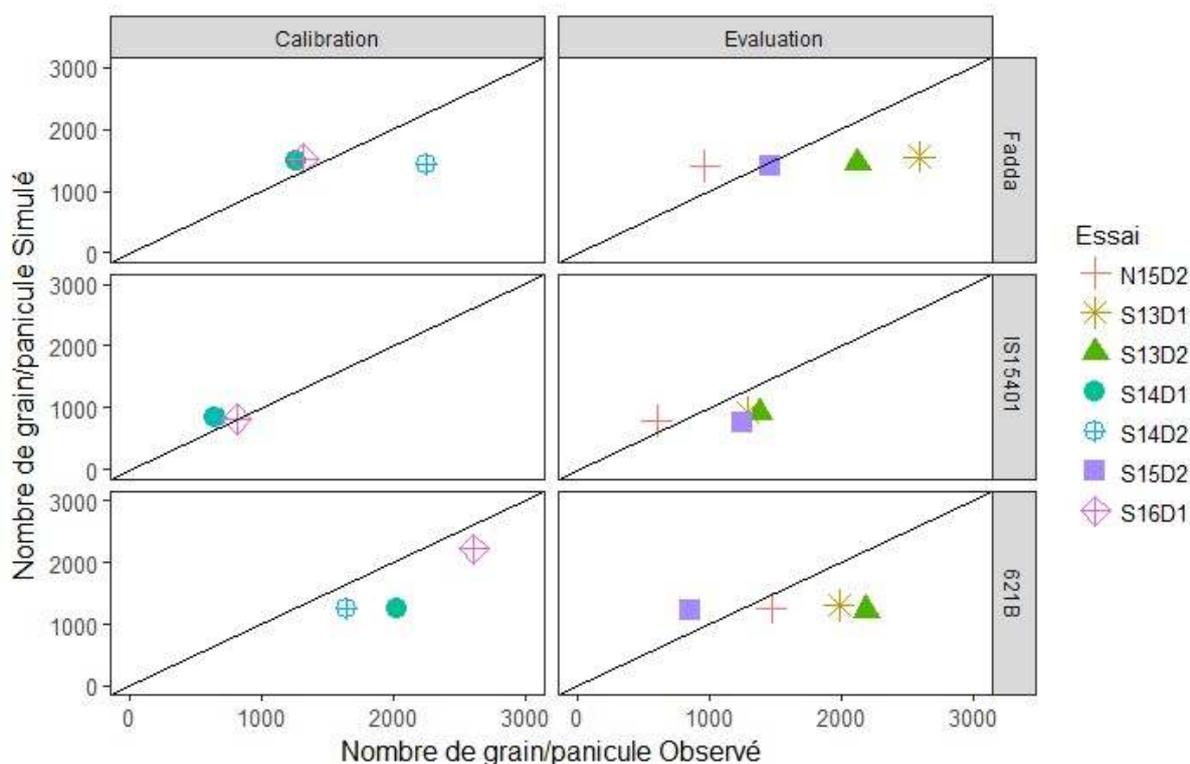


Figure 23 : Résultats du processus de calibration-évaluation du nombre de grain par panicule pour les trois génotypes contrastés étudiés.

Tableau 14 : Indice de performance de l'évaluation du modèle pour les rendements et composante des dix génotypes étudiés.

Génotype	RRMSE (en %)			CV (en %)		
	Rdt.grain	Rdt.biom	Nb.grain	Rdt.grain	Rdt.biom	Nb.grain
Fadda	9,4	79,1	39,1	7 – 16,5	5,9 – 67,4	5,9 – 65,1
IS15401	19,3	65,4	39,9	1,9 – 26,1	7,2 – 45,3	5,2 – 30,5
621B	82,2	11,4	42,8	5,2 – 23,5	9,6 – 25,4	11,0 – 15,2
Nieleni	92,0	89,0	13,4	4,9 – 26,9	7,2 – 24,5	6,4 – 18,7
Pablo	8,1	46,6	22,5	7,1 – 24,1	5,9 – 62,3	6,8 – 55,7
CSM63E	43,8	47,5	46,4	8,9 – 43,3	11,4 – 58,3	10,2 – 57,0
SK5912	65,2	73,3	45,2	6,3 – 28,3	21,4 – 35,5	15,9 – 30,5
Grinkan	29,8	11,4	29,3	2,4 – 35,9	11,7 – 32,4	10,7 – 28,9
Soumba	64,1	71,7	42,8	18,5 – 40,0	16,1 – 27,3	13,7 – 23,7
F2-20	87	74,5	44,3	9,6 – 27,4	12,5 – 34,7	9,2 – 32,5

RRMSE=Erreur quadratique moyenne relative ; CV=Coefficient de variation ; Rdt.grain = rendement en grain ; Rdt.biom = Rendement en biomasse ; NB.grain = Nombre de grain par panicule.

4.5 Discussion

Les données obtenues dans le cadre des expérimentations effectuées dans cette étude ont permis de calibrer et valider le modèle SAMARA pour différents géotypes de sorgho très contrastés dans divers environnements. Cette calibration et évaluation a nécessité l'ajustement de certains paramètres du modèle afin de minimiser les différences entre les valeurs observées et celles prédites pour la phénologie, la croissance et les rendements et leurs composantes.

4.5.1 Principales conclusions et qualité des données

Les résultats de la calibration-évaluation ont montré l'adaptabilité du modèle SAMARA à simuler le développement et la croissance de divers géotypes ayant des sensibilités à la photopériode différentes dans divers environnements. Pour la phénologie, les résultats ont montré un ajustement presque parfait entre valeurs observées et simulées des durées semis-floraison et semis-maturité avec des RRMSE respectives de 8 % et 6,6 % (soit 5 à 6 jours de différence) (tableau 11). Ces résultats suggèrent que le modèle de culture SAMARA peut être utilisé pour déterminer la durée de la culture pour la plupart des géotypes de sorgho dans les régions semi-arides d'Afrique de l'Ouest, renforçant ainsi la conclusion de Traore *et al.* (2007). Cependant, dans certaines situations, comme en S15D2, N15D2 et S14D2, SAMARA a bien simulé les dates de floraison et maturité des géotypes de type *guinea* à cycle long et forte photosensibilité (IS15401 et SK5912) et moins bien celles de 621B et Soumba de type *caudatum*. Ceci pourrait être expliqué par une plus forte sensibilité de ces géotypes aux maladies (N15D2 et S15D2) et ou au stress hydrique (S14D2) qui sévissaient dans ces essais.

Pour la dynamique des feuilles (figure 16 ; et tableau 12), les sorties simulées du modèle sont presque en parfaite adéquation avec les observées (RMAE entre 3,5 % et 16,3 %). Des travaux récents sur le sorgho (Akinseye *et al.*, 2017) avait déjà montré l'aptitude du modèle SAMARA à reproduire correctement la dynamique de la production des feuilles en comparaison d'autres modèles de cultures comme DSSAT et APSIM. Pour le LAI, des résultats peu satisfaisants ont été obtenus sur la plupart des géotypes, en particulier pour les géotypes Nieleni, 621B et F2-20 avec de fortes surestimations des LAI et des RMAE respectives de 80 %, 62,3 % et 67,3 % (figure 17 ; annexe 6 ; et tableau 12). Compte tenu de jaunissements observés en 2013 à Sinthiou Malem, signes de carences (en Fer notamment), sans doute liés aux ruissellements importants constatés en début de cycle, on peut supposer que ces géotypes de race *caudatum* y ont été plus sensibles d'où leurs surfaces foliaires réduites. Ce type de stress n'étant pas représenté dans le modèle SAMARA, il n'a donc pas pu être pris en compte.

Les hauteurs de plante ont été globalement bien simulées avec des RMAE comprises entre 17 % et 49,7 %. Cette valeur maximale de RMAE (49,7 %) correspond au génotype 621B dont les hauteurs ont été fortement sur-estimées. Ceci pourrait être dû aux mauvais développements de ce génotype en S14S1, S14S2 et S13S1 causés entre autres par des stress hydriques ou des ruissellements plus spécifiquement pour l'environnement S13S1. Le modèle a bien reproduit les dynamiques des biomasses feuilles de la plupart des génotypes avec des RMAE comprises entre 11,1 % et 34 % à l'exception de celles de Nieleni, SK5912, 621B et F2-20 qui montrent des biomasses sur-estimées, ce en lien aux mauvaises estimation des LAI (figure 18 ; annexe 7 ; et tableau 13). Par ailleurs SAMARA a mal simulé les biomasses des tiges et par suite les biomasses totales. Cette situation pourrait être expliquée par une mauvaise compensation de notre algorithme lors de l'optimisation vu que les hauteurs des plantes ont été bien simulées.

Les rendements en grains et les nombres de grains par panicule ont été correctement simulés par SAMARA avec des RRMSE comprises dans les erreurs d'observation pour les génotypes *guinea* Fadda, IS15401 et Pablo mais avec cependant moins de variation entre environnements d'évaluation que ce qui a été observé en réalité. Par contre les résultats simulés des types *caudatum* 621B, F2-20 et Soumba (figures 21 et 23 ; tableau 14 ; et annexe 8) sont fortement sur-estimés. Cette sur-estimation pourrait être imputée à la sensibilité de ces génotypes aux problèmes agro-pédologiques et phytosanitaires survenus durant les essais que le modèle ne prend pas en compte. Une surestimation des biomasses paille a également été observée avec SAMARA pour la plupart des génotypes (tableau 14 ; figure 22, et annexe 8). Cette sur-estimation du rendement final en biomasse paille pourrait être due en partie à une sous-estimation par le modèle de la sénescence terminale des feuilles responsables de la photosynthèse. En effet SAMARA ne prend pas en compte la nutrition azotée (N) et la mobilisation d'azote vers les grains est le principal facteur physiologique de la sénescence terminale des feuilles (Dingkuhn *et al.*, 1990; Wada et Wada, 1991).

4.5.2 Capacités du modèle SAMARA à la prise en compte de la plasticité phénotypique et des interactions génotype-environnements et à la définition d'idéotypes de sorgho

Les résultats d'ajustement des paramètres génotypiques utilisés dans cette étude ont montré la capacité de SAMARA à prédire la plasticité phénotypique dans notre gamme d'environnements. Les valeurs des paramètres génotypiques servant à la calibration du modèle ont varié plus ou moins fortement entre les génotypes puisque leurs coefficients de variation (CV) vont de 7,7 % à 98,8 %. Les paramètres les plus variables entre génotypes ont été la *TilAbility*, le *CoeffInternodeMass*, le *CoeffLeafDeath*, l'*InternodeLengthMax* et le *SlaMin* avec des coefficients de variation respectifs de 98,8 %, 85 %, 72,2 %, 71,2 % et 41,1 %. Tous ces paramètres se rapportent à l'architecture de la plante (capacité de tallage, taille de la tige, nombre de feuilles vertes, et épaisseur de la feuille) et ont été identifiés préalablement comme les caractères qui ont le plus contribué à la plasticité phénotypique des dix génotypes étudiés (chapitre 3). D'un autre côté SAMARA a correctement reproduit une faible plasticité phénotypique pour les paramètres *LeafLengthMax* (CV 9,8 %) et *CoeffLeafWLRatio* (CV 17 %) se rapportant à la taille de la feuille, faible plasticité qui avait aussi bien été observée dans l'étude de la plasticité phénotypique des dix génotypes (chapitre 3). Ceci démontre la capacité du modèle SAMARA à reproduire finement la diversité génétique au sein de nos génotypes étudiés. Ainsi, SAMARA pourrait constituer un puissant outil dans l'étude de la diversité génétique d'une population plus grande de génotypes. Au-delà de cela il pourrait également être utilisé à la définition d'idéotypes variétaux de sorghos, c'est-à-dire comme un outil permettant de simuler des combinaisons optimales de caractères morphologiques et physiologiques assurant des performances recherchées pour des environnements spécifiques. Kumar *et al.* (2016) avaient déjà montré sur le riz la capacité du modèle SAMARA à reproduire la plasticité phénotypique en étudiant la plasticité phénotypique des traits contribuant au potentiel de rendement de 12 génotypes de riz dans quatre environnements contrastés aux Philippines.

Les résultats de l'étude ont aussi mis en évidence une variation des rendements entre les sept environnements qui suggère l'existence d'interactions génotype-environnement. Mais elle n'est cependant pas assez bien représentée par le modèle en comparaison de la réalité (figures 24 et 25) : de fait les variations entre rendements en grains simulés des différents génotypes à travers nos environnements d'étude ont été faibles comparées à celles observées sur le terrain. De plus le modèle a tendance à sous-estimer les rendements grains des types *guinea* tout en les faisant peu varier et à sur-estimer grandement les rendements des types *caudatum*. Il en est de même

pour la biomasse paille que le modèle a globalement tendance à sur-estimer pour les types *guinea* et à sous-estimer pour les *caudatum*. On peut penser que ces différences entre simulations et observations sont en partie imputables aux problèmes de carences (jaunissements) et maladies que le modèle ne simule pas alors qu'ils augmentent la variabilité des rendements dans nos environnements d'étude (chapitre 1). Ces résultats mettent en exergue les limitations d'un modèle comme SAMARA à reproduire correctement toutes les interactions génotype-environnement sur les rendements en grains et en biomasse paille (variables intégratives) si des contraintes environnementales autres que celles prises en compte dans le modèle ont gouverné certaines des interactions.

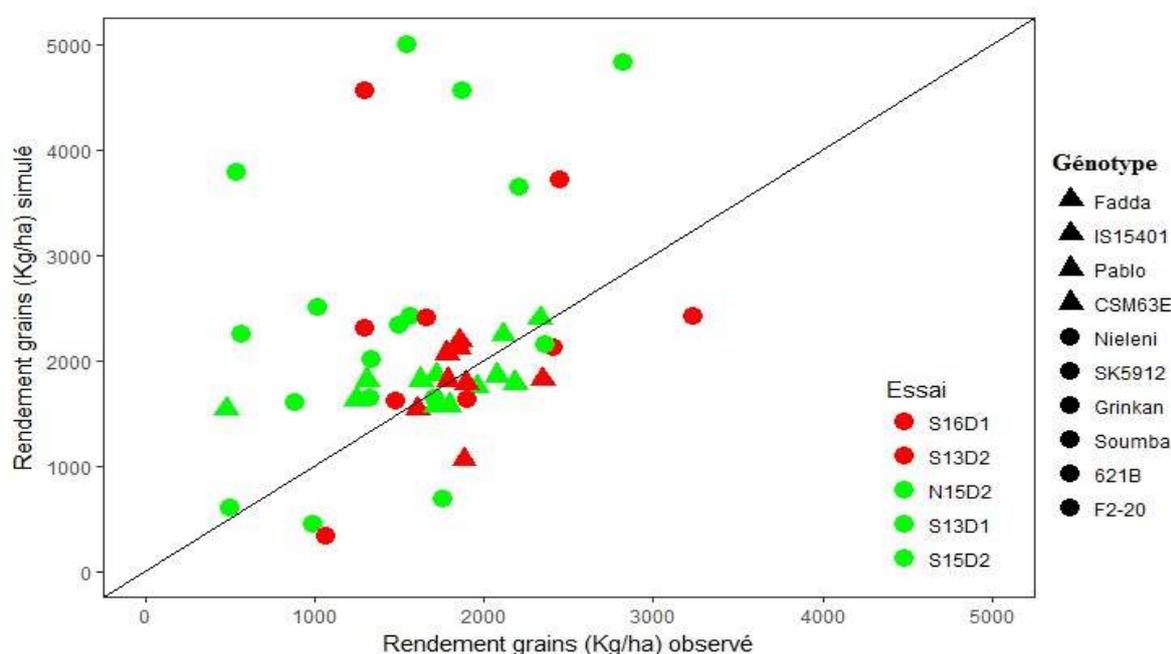


Figure 24: Rendements en grains observés et simulés des dix génotypes étudiés à travers nos environnements d'étude.

Les triangles représentent les types guinea, les cercles les types caudatum ; la couleur rouge indique les essais optimaux, celle verte les essais où des contraintes ont été notées.

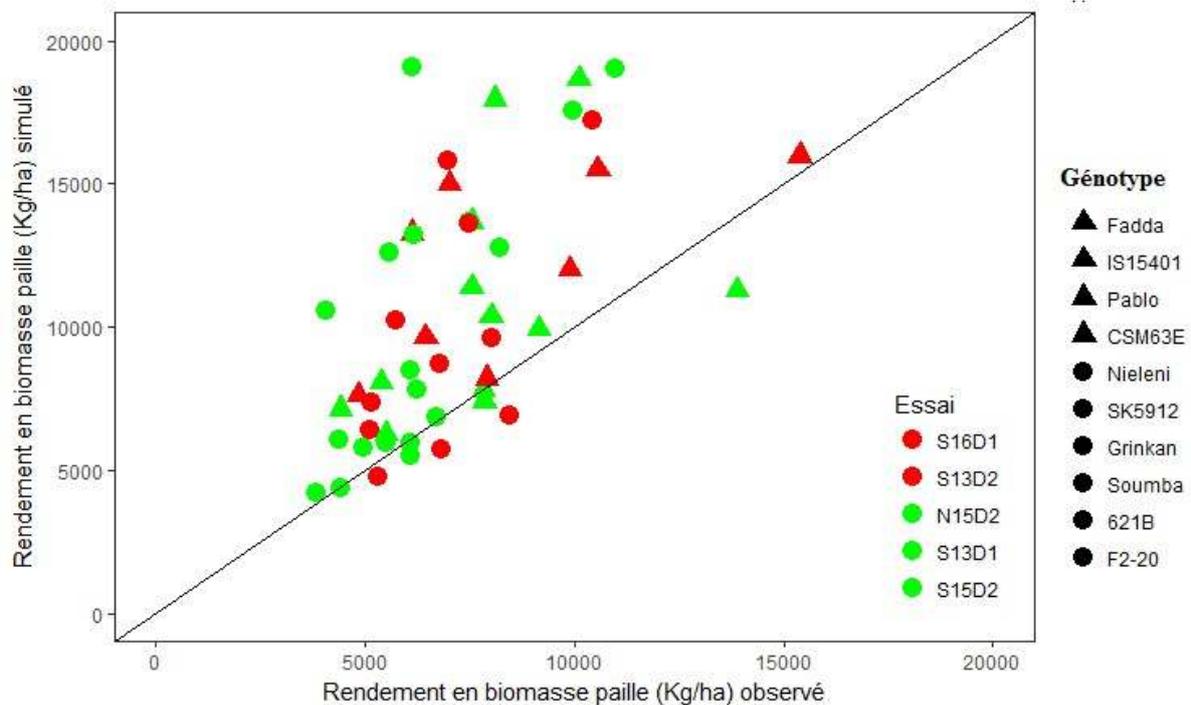


Figure 25: Rendements en biomasse paille observés et simulés des dix génotypes étudiés à travers nos environnements d'étude.

4.6 Conclusion

L'étude a permis de calibrer et valider le modèle de culture SAMARA sur dix génotypes de sorghos contrastés dans divers environnements au Sénégal en tenant compte de la plasticité phénotypique des caractères agro-morphologiques de ces génotypes. Le modèle a été en mesure de reproduire les plasticités phénotypiques de la phénologie, du développement des feuilles et des dynamiques des biomasses par rapport aux données de terrain avec des estimations d'erreur minimales sur divers environnements. Par contre des résultats globalement peu satisfaisants ont été notés sur les simulations des rendements en grains et des nombres de grains par panicule à travers les environnements. De plus les rendements en biomasse paille ont été surestimés pour la plupart des génotypes par le modèle et il est probable que cela vienne de la non prise en compte de la sénescence terminale des feuilles qui est dépendante de la fourniture d'azote, ce parce que les flux d'azote ne sont pas pris en compte dans la structure du modèle. Le fait qu'il n'y ait actuellement aucune disposition dans SAMARA pour simuler la dynamique de l'azote dans la culture peut donc limiter les compétences prédictives du modèle pour la plasticité phénotypique dans des conditions limitées en N, conditions qui sont fréquentes en Afrique de l'Ouest.

Chapitre 5 : Conception d'idéotypes de sorgho double-usages à hauts rendements en grains et en biomasses adaptés à divers environnements cibles du Sénégal

5.1 Résumé

Le sorgho est une culture économe en eau, ce qui en fait une céréale importante dans les environnements semi-arides et arides, où l'eau est le principal facteur limitant de la production. Pour maintenir ou obtenir des rendements élevés dans ces environnements, une des pistes serait la mise à disposition des agriculteurs de nouveaux géotypes de sorghos dotés de caractéristiques agro-morphologiques spécifiques leur conférant une double production élevée (grains et biomasses). Le modèle SAMARA a été utilisé pour définir des idéotypes de sorgho double usage pour différents environnements cibles. 67 ans de conditions météorologiques quotidiennes (1950 – 2016) ont servi aux simulations considérant les localités de Bambey, Nioro du Rip et Sinthiou Malem (Sénégal) aux conditions environnementales différentes (sol et climat). Les simulations pour l'identification des paramètres génotypiques optimaux des nouveaux idéotypes de nos trois environnements cibles ont permis de montrer que pour obtenir une double production élevée et stable, les idéotypes de sorgho devraient avoir une tige épaisse et des panicules de grande taille mais aussi une forte capacité de colonisation du sol en profondeur par les racines et une forte capacité à maintenir longtemps une importante surface de feuille verte, surtout dans les zones les moins arrosées comme Bambey. Les résultats sur les performances agronomiques des idéotypes conçus ont montré que l'optimisation de l'idéotype a essentiellement porté dans le sens d'une amélioration du grain et peut produire potentiellement 46 %, 45 % et 29 % de grains en plus que le géotype de référence Nieleni dans ces différents environnements respectifs. Pour l'aptitude à la double production de l'idéotype conçu les résultats ont montré qu'à Sinthiou Malem l'optimisation a été favorable pour la double production, à Nioro du Rip elle a joué sur le grain uniquement (mais très fortement) alors qu'à Bambey elle a également porté fortement sur le rendement en grain mais au détriment un peu de la biomasse. Ainsi, nos idéotypes conçus peuvent être un support de réflexion pour l'augmentation de la productivité au niveau de nos environnements cibles et nous recommandons la prise en compte de ces caractères lors de l'identification de géotypes appropriés dans les programmes de sélection du sorgho dans nos environnements cibles.

Mots – clés : Sorgho, double production, SAMARA, idéotype, environnement cible.

5.2 Introduction

La sécurité alimentaire est devenue un enjeu majeur compte tenu de la nécessité d'augmenter l'offre alimentaire mondiale d'environ 70 % en 2050 (FAO, 2009). Vu les limites qui s'imposent de plus en plus à l'expansion des superficies cultivées dans les pays en développement (saturation foncière en lien aux évolutions démographiques), une augmentation significative de la productivité des cultures semble nécessaire pour atteindre cet objectif. Le sorgho est la cinquième culture céréalière la plus importante au monde et constitue l'aliment de base de plus de 500 millions de personnes dans plus de 30 pays (ICRISAT, 2009). C'est une culture économe en eau, ce qui en fait une céréale importante dans les environnements semi-arides et arides, où l'eau est le principal facteur limitant de la production. Malgré son potentiel élevé de rendements en termes de grains et biomasses, la production du sorgho est très sensible aux conditions environnementales. Au Sénégal, le rendement du sorgho, troisième céréale pluviale après le mil et le maïs, reste faible (1020 Kg.ha^{-1} ; ANDS, 2018) avec une superficie totale estimée à plus de 221 329 ha pour une production nationale de 225 865 tonnes. En effet sa culture est confrontée à un certain nombre de contraintes parmi lesquelles la faible fertilité des sols (Vanlauwe *et al.*, 2010) et la non-utilisation ou faible taux d'utilisation d'intrants agricoles (engrais, variétés améliorées) (Gerstenmier et Choho, 2015). A cela, s'ajoutent les variabilités inter et intra-annuelles de la pluviométrie (Hansen, 2002).

Pour changer cela une des pistes serait la mise à disposition des agriculteurs de génotypes plus performants et adaptés à ces conditions de culture. Ainsi, de nouveaux génotypes de sorghos dotés de caractéristiques agro-morphologiques spécifiques leur conférant une double production élevée (grains et biomasses) dans ces environnements seraient les bienvenus. Donald (1968) a été l'un des premiers à proposer une approche de « sélection d'idéotypes » pour étayer les programmes d'amélioration variétale qui reposaient jusque-là sur deux philosophies de sélection : « élimination des défauts » d'une part et « sélection pour le rendement » d'autre part (Chantereau et Nicou 1991). Il a défini « l'idéotype variétal » comme une plante idéalisée, ou un modèle de plante (pas encore au sens de modèle mathématique), qui devrait produire une plus grande quantité ou qualité en termes de rendement lorsqu'il est cultivé en tant que cultivar. Il a souligné que le développement de nouveaux idéotypes fournira une base pour une meilleure compréhension de l'écologie et de la physiologie des plantes et conduira à des idéotypes de plus en plus efficaces. En revanche, la « sélection pour le rendement » a des limites car la combinaison souhaitable de traits, qui ne sont jamais explicitement considérés, ne peut être atteinte que par hasard.

Compte tenu du besoin urgent d'augmenter les rendements du sorgho, le développement de variétés de sorgho à double-usage est à privilégier par une amélioration de la plante entière. Afin de développer des idéotypes de sorgho à haut rendements en grain et biomasse, plusieurs caractères ont été identifiés comme étant importants pour l'amélioration des rendements du sorgho : la longueur d'entre-nœud, le diamètre de la tige, le nombre et la taille de la feuille, et le nombre de grain par panicule (chapitre 3).

Reynolds et al. (2011) ont souligné l'importance de la modélisation mathématique en tant qu'outil puissant pour comprendre les combinaisons optimales et les compromis entre les traits proposés pour la création d'idéotypes variétaux. Les modèles de culture basés sur les processus écophysologiques sont couramment utilisés dans la recherche fondamentale et appliquée en sciences végétales et en gestion des ressources naturelles (Passioura 1996, Sinclair et Seligman 1996, Hammer *et al.*, 2002, Rotter *et al.*, 2011, White et al., 2011). Ils fournissent le cadre le plus connu pour intégrer notre compréhension des processus complexes des plantes et de leurs interactions avec le climat et l'environnement. Ces modèles jouent un rôle croissant dans l'orientation de la recherche fondamentale en fournissant des prédictions quantitatives et en soulignant les lacunes de nos connaissances (Tardieu 2003, Hammer *et al.*, 2006, 2010, Semenov et Halford, 2009, Semenov et Shewry, 2011). La modélisation peut donc fournir une approche rationnelle pour concevoir et tester *in silico* de nouveaux idéotypes de sorghos optimisés pour nos environnements (Hammer *et al.*, 2006, Semenov et Halford, 2009, Tardieu et Tuberosa, 2010, Semenov et Shewry, 2011, Quilot-Turion *et al.*, 2012).

Ainsi, cette étude vise à illustrer la capacité de la modélisation dans la conception d'idéotypes de sorghos à hauts rendements à la fois en grains et en biomasse pour des environnements cibles au Sénégal en utilisant le modèle de culture SAMARA (calibré et validé dans le chapitre 4) qui simule la croissance et le développement des cultures à un pas de temps journalier.

5.3 Matériel et Méthodes

5.3.1 Conception d'idéotypes de sorghos double-usages : choix des traits d'intérêt

SAMARA, comme la plupart des modèles de culture, implique de nombreux paramètres dont il faut connaître ou estimer les valeurs pour en informer le modèle afin qu'il puisse fonctionner le plus correctement possible : ils sont au nombre de 76 chez SAMARA (Dingkuhn *et al.*, 2013). Heureusement certains influent peu, d'autres sont relativement connus et peu variables, de sorte qu'il n'est pas nécessairement question de tous les optimiser. Un choix doit donc être fait pour la conception d'idéotype, qui se fait en fonction des caractères d'intérêt - i.e. des variables de sortie du modèle - à optimiser et de la sensibilité de ces variables aux valeurs des paramètres qui les influent. Ainsi, le choix des paramètres sur lesquels l'optimisation pour la conception des idéotypes doit se faire, est déterminé soit par avis d'expert, soit en se basant sur des études de terrain et de modélisation menées au préalable pour l'identification des caractères (paramètres du modèle) auxquels sont sensibles les caractères d'intérêt, en l'occurrence ici les rendements en grain et en biomasse.

L'étude préalablement menée des associations et plasticité des caractères contributifs à la fois au rendement en grain et au rendement en biomasse (chapitre 3) a mis en exergue quatre traits d'intérêt qui ont été fortement corrélés à la fois aux rendements grain et biomasse, et qui apparaissent donc comme des caractères prometteurs pour l'amélioration du potentiel de rendement du sorgho double-usage : le nombre de feuilles vertes, le diamètre de la tige, la longueur de l'entrenœud et le nombre de grains par panicule (fortement corrélé au rendement grain). Le chapitre 4 nous a ensuite permis de définir les paramètres du modèle SAMARA qui correspondent à ces traits d'intérêt et dont les valeurs affectent les variables de sorties qui nous intéressent, à savoir le rendement grain et le rendement biomasse. Pour l'optimisation les paramètres génotypiques du modèle utilisés sont ceux qui s'apparentent aux caractères explicités plus haut : il s'agit du *CoeffLeafDeath* pour le nombre de feuilles vertes, du *CoeffInternodeMass* pour le diamètre de la tige, de l'*InternodeLengthMax* pour la longueur de l'entrenœud et du *CoeffPaniculeMass* pour le nombre de grains par panicule. En plus de ces paramètres, la longueur maximale des racines (*RootFrontMax*) a été prise en compte du fait de son importance dans nos environnements qui sont souvent confrontés au stress hydrique. De plus on rappelle que ces paramètres ont été très variables entre nos génotypes (chapitre 4). La plage de valeur de ces paramètres (valeurs minimale et maximale) a été basée sur les valeurs

minimale et maximale observées durant les expérimentations ou bien sur la plage de valeurs des paramètres issus de la calibration selon les génotypes (tableau 15).

5.3.2 Paramètres génotypiques utilisés pour l'optimisation

Nous expliquons dans cette section la signification de chaque paramètre choisi, et donc comment il permet de représenter les traits d'intérêt de la plante que nous ciblons pour la définition d'idéotype.

Coefficient de sensibilité de la mortalité des feuilles (CoeffLeafDeath) : ce paramètre règle la mortalité des feuilles durant la phase végétative et en fin de cycle, dont en particulier pendant la phase de remplissage des grains du sorgho. Les plantes peuvent améliorer considérablement l'interception et la conversion de la lumière, et donc la production d'assimilats, par le maintien d'un plus grand nombre de feuilles à l'état vert, ce qui permet plus de production de grain et de biomasse. Ceci peut permettre aussi de mieux faire face aux effets d'un stress hydrique en fin de cycle. L'exploitation de ce caractère, appelé « stay-green », dans les programmes de sélection est susceptible d'entraîner une amélioration du rendement en grain du sorgho et de la valeur industrielle de sa biomasse.

Masse structurale des entre-nœuds (CoeffInternodeMass) et longueur maximale de l'entre-nœud (InternodeLengthMax) : ces caractères sont importants pour la double production avec leur forte corrélation à la fois au rendement grain et au rendement biomasse (chapitre 3). Par conséquent, l'identification de génotypes à tiges plus longues et plus fortes et épaisses est nécessaire. Une bonne accumulation de matière dans les tiges (gérée dans le modèle par le paramètre CoeffInternodeMass) peut permettre à la plante de mobiliser plus de réserves accumulées dans les tiges (dans les entre-nœuds), en particulier en fin de saison des pluies. Cette accumulation induit un diamètre de tige plus important et par suite une meilleure résistance à la verse. La longueur de l'entre-nœud de la plante (InternodeLengthMax) conditionne sa hauteur (produit du nombre d'entre-nœuds par leur longueur) et est donc une composante importante de la biomasse. Une optimisation entre ces deux traits permet de définir une tige qui soit assez grande et assez épaisse pour pouvoir produire assez de biomasse.

Masse structurale de la panicule (CoeffPanicleMass) : ce paramètre règle le taux de croissance des parties structurelles de la panicule entre l'initiation paniculaire et la floraison. Ce paramètre gère donc le nombre potentiel de grains qui est chez les céréales une des composantes du rendement les plus fortement corrélées avec le rendement (chapitre 3). La bonne gestion de ce paramètre est donc importante pour développer le potentiel de rendement en grain, et par suite l'indice de récolte. Chez le sorgho, le nombre de grains est fonction du nombre de panicules par unité de surface et du nombre de grains par panicule, eux-mêmes respectivement fonctions des nombre de talles produites et de la survie des talles, et du nombre potentiel de fleurs par panicule et de la fraction de fleurs devenues fertiles. Comme les interactions entre toutes ses composantes rendent très difficile dans les modèles une quantification précise du nombre de grains à partir d'elles (Fischer, 1993), le nombre de grains par unité de surface a été le plus souvent déterminé via l'accumulation de biomasse et le taux de croissance. En particulier chez le sorgho, le nombre de grains est plus étroitement lié à l'accumulation de matière sèche un peu avant et durant l'anthèse qu'à l'accumulation de matière sèche après celle-ci / l'initiation paniculaire (début de développement de la panicule) (Gerik *et al.*, 2004). Comme, il est possible que la croissance et le développement de la panicule soient affectés par des compétitions entre organes (comme la tige) pour l'obtention de ressources, il est nécessaire de trouver un compromis entre cette accumulation de matières et les autres organes.

Longueur maximale des racines (RootFrontMax) : les racines jouent un rôle majeur dans le rendement et la productivité globale des plantes (Herder *et al.*, 2010) car elles interviennent dans leurs processus d'alimentations hydrique et minérale. Dans nos environnements affectés par un faible niveau de fertilité des sols et des pluviométries irrégulières, la vitesse de progression du front racinaire et le degré de colonisation du sol par les racines sont donc deux caractéristiques importantes (Chopart, 1980 ; Maertens *et al.*, 1974). C'est d'autant plus vrai que les couches superficielles se dessèchent le plus rapidement et que donc les racines devront puiser l'eau nécessaire aux plantes dans les couches les plus profondes. Elles peuvent donc jouer un rôle important lors de séquences de jours sans pluie, en particulier en fin de cycle pour sécuriser le rendement. En revanche les racines utilisent de l'énergie qui est donc perdue pour les grains. Donc le développement racinaire constitue un paramètre indiqué pour un compromis.

Tableau 15: Paramètres génotypiques utilisés pour l'optimisation de l'idéotype et leur plage de variation.

Paramètre	Définition	unité	Plage de variation
RootFrontMax	Longueur maximale des racines	mm	200 – 2000*
CoeffLeafDeath	Coefficient de sensibilité à la mortalité des feuilles	-	0 - 0,03
CoeffInternodeMass	Masse structurale de l'entre-nœud	g.mm ⁻¹	0.005 – 0,1
InternodeLengthMax	Longueur maximale de l'entre-nœud	mm	80 - 500
CoeffPanicleMass	Masse structurale de la panicule	fraction	0,12 – 0,3

*Plage de variation donnée dans le modèle SAMARA

5.3.3 Méthode d'optimisation pour définir des idéotypes de sorghos double-usages

L'objectif est de définir des idéotypes de sorgho double usage pour différents environnements cibles à l'aide du modèle de culture SAMARA.

Nos trois sites d'expérimentation (chapitre 2 et 3) ont été utilisés dans cette étude comme environnements cibles pour l'optimisation des idéotypes de sorgho double-usages : Bambey, Sinthiou Malem et Nioro du Rip. Pour chaque environnement, 67 ans de conditions météorologiques quotidiennes spécifiques à chaque environnement ont servi aux simulations : données officielles de la DNM sur la période 1950 – 2016 mises au propres par ISRA-CERAAS de précipitations moyennes, températures maximales et minimales, radiations et insolation solaires, humidités minimales et maximale, vitesse du vent à deux mètres du sol, et évapotranspiration potentielle (méthode FAO). Chaque environnement est également caractérisé par son type de sol, son itinéraire technique (issus de nos expérimentations, chapitre 2 et 3), et par une date de semis basée sur le critère pluviométrique utilisée par Sambakhé (2018), à savoir l'obtention d'un cumul de pluie de 30 mm sur 3 jours consécutifs. Ce critère est une adaptation du critère de « 20 mm sur 3 jours » habituellement utilisé en Afrique de l'Ouest (Balme *et al.*, 2005), qui a pour but de sécuriser les levées du sorgho. En effet, dans les environnements cibles, et en général en Afrique de l'Ouest, on assiste de plus en plus à une instabilité des dates de démarrage des saisons des pluies avec des séquences sèches qui occasionnent des re-semis.

Nous avons considéré le génotype Nieleni comme notre référence vu ses aptitudes pour le double usage, pour définir les paramètres génotypiques initiaux nécessaires au modèle SAMARA. Les valeurs issues de la calibration ont été utilisées (tableau 10, chapitre 4). Ensuite nous avons optimisé pour chaque environnement cible les cinq paramètres génotypiques qui ont été décrits dans la section précédente pour définir l'idéotype type de chacun de ces environnements. Pour cette optimisation, les valeurs minimales et maximales (plage de variation pour l'optimisation) ont été définies en fonction des valeurs minimales et maximales observées sur l'ensemble de nos expérimentations pour le génotype Nieleni (Tableau 15).

Pour ce faire, l'algorithme d'optimisation génétique Rgenoud (Package R) a été couplé au modèle SAMARA (Sambakhé, 2018), ce qui permet d'optimiser les paramètres des génotypes pour la meilleure performance des idéotypes de sorgho dans un environnement cible, c'est-à-dire de définir un jeu de paramètres génotypiques qui maximise les rendements en grains et en biomasses paille. Nous avons optimisé les cinq paramètres choisis sur les 67 ans de climat de chaque environnement cible. Cela a permis de définir l'idéotype, par environnement cible, dont le rendement moyen (en grain et biomasse) sur 67 ans est le plus élevé et le coefficient de variation le plus faible. Ainsi, on obtient un idéotype par environnement cible, ayant un rendement en grain et biomasse élevé et stable. La fonction P à optimiser a été donc définie sous la forme suivante :

$$P = \max \left\{ \begin{array}{l} \text{Moyenne rendement simulé des 67ans} \\ \text{Pour un} \\ \text{Coefficient de variation minimum} \end{array} \right. \quad (\text{Eq 5.1})$$

5.3.4 Analyse des performances des idéotypes

Pour la comparaison à travers les environnements cibles entre le génotype de référence Nieleni et l'idéotype issu de l'optimisation par le modèle, un scatterplot a été réalisé. Pour cela, on a d'abord simulé le génotype de référence et l'idéotype de référence pour chaque environnement cible sur les 67 années. Ensuite pour comparer les performances de Nieleni et de l'idéotype en termes de productions de grains et de biomasses paille on a repris le principe de l'indice d'aptitude d'un génotype (I_{AP}) à la production de grain (ou de biomasse paille) pour un environnement cible donné (cf. Eq 2. 3 au chapitre 2). Les rendements utilisés pour le calcul de chaque indice, pour un environnement cible donné, sont d'une part la moyenne des rendements du génotype sur les 67 années dans cet environnement cible, et d'autre part la moyenne des rendements des deux génotypes sur cette même période sur l'ensemble des différents environnements cibles.

Ainsi, pour un environnement cible j donné, un I_{AP} positif ($I_{AP} > 0$) du génotype ou d'un idéotype i donné pour le grain (ou pour la biomasse paille) indique une bonne aptitude de ce génotype ou de cet idéotype i pour la production de grains (ou pour celle de biomasse paille) pour cet environnement cible j (et inversement si l' I_{AP} est négatif). Des I_{AP} positifs (ou négatifs) à la fois pour le grain et la biomasse paille indiqueront donc une bonne (ou mauvaise) aptitude à la double production (grain et biomasse paille) pour le génotype ou l'idéotype i pour l'environnement cible j donné.

5.4 Résultats

5.4.1 Paramètres génotypiques des idéotypes pour la double production

Les résultats des simulations pour l'identification des paramètres génotypiques optimaux des nouveaux idéotypes de nos trois environnements cibles sont présentés dans le tableau 16. Quel que soit notre environnement cible, pour obtenir un rendement en double production élevé et stable, il apparaît qu'il faut augmenter (i) le « stay-green » des feuilles avec la valeur du $CoeffLeafDeath$ qui diminue, (ii) la masse structurale (réserve de la tige) et la longueur maximale des tiges avec les $CoeffInternodeMass$ et $InternodeLengthMax$ qui augmentent et enfin également (iii) le potentiel de rendement grain avec une augmentation de la valeur de $CoeffPanicleMass$.

Pour obtenir des rendements élevés et stables, une augmentation de la capacité des feuilles à se maintenir vertes, de la réserve des tiges et de la masse structurale des panicules est donc nécessaire à Bambey, à Sinthiou Malem et à Nioro du Rip. Les paramètres génotypiques optimisés pour nos trois idéotypes ont varié entre 0 et 0,0001 pour le coefficient de sensibilité de mortalité des feuilles ($CoeffLeafDeath$), entre 0,078 $g \cdot mm^{-1}$ et 0,092 $g \cdot mm^{-1}$ pour la masse structurale des entre-nœuds ($CoeffInternodeMass$), entre 222,5 mm et 275,6 mm pour la longueur maximale de l'entre-nœud ($InternodeLengthMax$), et entre 1300 mm et 1775 mm pour la longueur maximale des racines ($RootFrontMax$). La masse structurale de la panicule ($CoeffPanicleMass$) a été de 0,3 pour nos trois idéotypes, et enfin on peut noter que le $CoeffLeafDeath$ est resté à la valeur zéro pour l'ensemble des idéotypes conçus.

Un point important à souligner est que pour obtenir des rendements en double production élevés et stables à Bambey qui est l'environnement recevant le moins de pluviométrie, il faut le maintien du caractère « stay-green » et une longueur maximale des racines, ce afin de minimiser les effets du stress hydrique. Il est important de souligner aussi que le $CoeffPanicleMass$ est

resté constant indépendamment des environnements et que plus l'environnement est défavorable plus les tiges sont épaisses mais courtes.

Tableau 16 : Paramètres génotypiques optimisés de l'idéotype conçu selon les environnements cibles.

Paramètre	Root Front Max	Coeff Leaf Death	Coeff Internode Mass	Internode Length Max	Coeff Panicle Mass
Nieleni	1500	0,0054	0,068	196,0	0,25
Id_Sinthiou_Malem	1300	0,0001	0,078	275,6	0,3
Id_Nioro_du_Rip	1402	0,0001	0,08	245,0	0,3
Id_Bambey	1775	0	0,092	222,5	0,3

Id = Idéotype

5.4.2 Performances agronomiques des idéotypes de sorgho et aptitude à la double production

Les rendements moyens en grains et biomasse paille des idéotypes et du génotype de référence (Nieleni) sont présentés au tableau 17. D'une manière générale, les rendements des idéotypes sont plus élevés à Sinthiou Malem et à Nioro du Rip comparé à Bambey. Les rendements en grains simulés ont été, respectivement pour Nioro du Rip, Sinthiou Malem et Bambey, de 4345 Kg.ha⁻¹, 4282 Kg.ha⁻¹ et 3339 Kg.ha⁻¹ pour l'idéotype contre 2996 Kg.ha⁻¹, 3173 Kg.ha⁻¹ et 2292 Kg.ha⁻¹ pour le génotype de référence. Ainsi, l'idéotype optimisé peut produire potentiellement 29 %, 45 % et 46 % de grains en plus que le génotype de référence dans ces différents environnements respectifs. Pour la biomasse paille, les rendements simulés pour l'idéotype et le génotype de référence ont été du même ordre de grandeur dans chaque environnement cible et ont varié, selon les environnements, entre 19725 Kg.ha⁻¹ et 28670 Kg.ha⁻¹ pour l'idéotype et entre 19893 Kg.ha⁻¹ et 28343 Kg.ha⁻¹ pour le génotype de référence, ce qui montre que l'optimisation de l'idéotype a essentiellement porté dans le sens d'une amélioration du grain.

La figure 26 présente pour chaque génotype ses indices d'aptitude à la production de grain et de biomasse paille dans les 3 environnements cibles. On peut noter qu'à Sinthiou Malem l'optimisation a été favorable pour la double production (beaucoup d'amélioration pour le grain et un peu pour la biomasse par rapport à Nieleni), à Nioro du Rip elle a joué sur le grain uniquement (mais très fortement) alors qu'à Bambey elle a également porté fortement sur le rendement en grain mais au détriment un peu de la biomasse.

Tableau 17: Rendements moyens en grains et biomasse de l'idéotype et du génotype de référence à travers les environnements cibles.

Environnement	Génotype	Rendement en biomasse paille (Kg.ha ⁻¹)	Rendement en grains (Kg.ha ⁻¹)
Bambey	Idéotype	19725 ± 3894	3339 ± 1090
Bambey	Nieleni	19893 ± 4369	2292 ± 1479
Nioro_du_Rip	Idéotype	24858 ± 3391	4345 ± 526
Nioro_du_Rip	Nieleni	24824 ± 3866	2996 ± 727
Sinthiou_Malem	Idéotype	28670 ± 3242	4282 ± 288
Sinthiou_Malem	Nieleni	28343 ± 3725	3173 ± 425

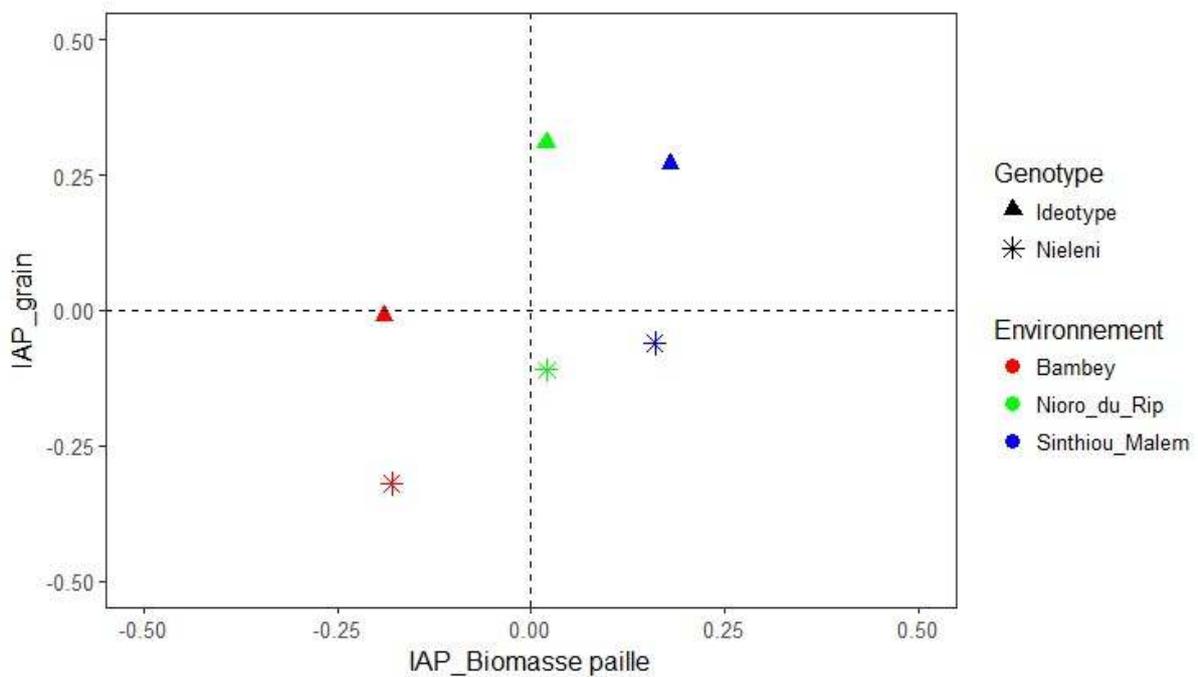


Figure 26 : Comparaisons des aptitudes à la double production des 3 idéotypes et du génotype de référence Nieleni sur les 3 environnements cibles via les indices I_{AP}.

5.5 Discussions

La sélection des plantes vise à développer des génotypes performants et se cantonne pour cela à utiliser des méthodes améliorées de sélection des plantes afin de maximiser le gain génétique et la rentabilité. La modélisation de la croissance des cultures peut permettre de guider le processus de sélection en étudiant *in silico* les performances de combinaisons de traits pour pouvoir ensuite identifier des génotypes candidats optimaux pour des environnements cibles. Ainsi nos résultats ont démontré qu'une augmentation substantielle des rendements en double production (grain et biomasse) était possible pour un génotype donné dans un environnement donné en optimisant ses paramètres génotypiques via une démarche combinant un outil et des règles d'optimisation et les simulations d'un modèle de culture faites sur les données historiques de cet environnement. Nous l'avons fait avec le modèle SAMARA pour nos trois environnements cibles : Bambey, Sinthiou Malem et Nioro du Rip. SAMARA a montré que les caractères tels que la longueur maximale des racines, le « stay-green », la longueur d'entre-nœud, la masse structurale de la tige et celle de la panicule seraient à considérer dans l'identification d'idéotypes double-usage pour les environnements cibles.

5.5.1 Importance des paramètres génotypiques des idéotypes optimisés

Cette étude sur la définition d'idéotype a une fois de plus montré l'importance d'une plante à avoir une très bonne colonisation du sol par ses racines, un maintien des feuilles à l'état vert le plus longtemps possible (caractère « stay-green »), une bonne hauteur de la tige et une masse importante de la panicule pour assurer un bon potentiel de rendement en grains et en biomasses pour nos environnements cibles d'étude. Ces paramètres reposent sur de solides bases écophysiologicalues.

L'étude a donc montré que les idéotypes de sorghos double usage devraient avoir une longueur maximale de racine plus profonde surtout dans les environnements sujet à des stress hydriques en fin de cycle et/ou avec des sols profonds à dominance sableuse comme ceux de Bambey (chapitre 2). Dans cette étude, les longueurs maximales des racines des idéotypes élaborés ont été comprises entre 1300 mm et 1775 mm. Ces résultats sont en accord avec ceux de Chopart (1980) qui en étudiant le système racinaire du sorgho au Sénégal a montré que la longueur maximale des racines varie entre 1100 mm à 1300 mm et a abouti à la conclusion qu'il faudrait surtout pour les nouveaux génotypes, plus performant du point de vue du potentiel de rendement, qu'ils n'aient pas, par ailleurs, des systèmes racinaires moins bien développés que les génotypes actuels. De même, Sambakhé (2018) en définissant des idéotypes de sorgho

grains au Sénégal a montré l'importance des racines longues pour stabiliser les rendements dans différents environnements cibles et en particulier pour Bambey. Chopart (1980) avait également mis en avant la vitesse du développement racinaire.

Il apparait aussi que les idéotypes de sorgho double production devraient aussi avoir un nombre élevé de feuilles vertes qui se maintient le plus tard possible. Ce trait d'intérêt dépend d'une part du nombre total de feuilles produites, qui est conditionné par la vitesse de production des feuilles, donc par le phyllochrone, d'autre part de la capacité de la plante à maintenir ses feuilles vertes (caractère « stay-green »), en particulier pendant le remplissage du grain pour nos environnements sujets à des épisodes de sécheresse. Ainsi, l'amélioration des rendements des idéotypes que nous avons conçus pourrait être due à l'amélioration de l'efficacité de l'interception et de la conversion de la lumière (du fait du maintien des feuilles à l'état vert) qui permettent de maintenir plus longtemps une production d'assimilats importante, et par suite de faire plus facilement face à des stress hydriques de fin de saison. Ainsi, à Bambey pour avoir un sorgho assurant la double production, un maintien d'un nombre important de feuilles à l'état vert « stay-green » est primordial (CoeffLeafDeath égale à 0). L'importance de ce caractère sur le sorgho a été rapporté par plusieurs auteurs (auteurs : Borrell *et al.*, 1999, 2000b; Haussmann *et al.*, 2002; Jordan *et al.*, 2003).

Cette étude a révélé aussi l'importance d'une masse structurale paniculaire élevée (nombre potentiel de grains élevé) pour la production de grain. Tous les idéotypes développés ont eu des masses paniculaires très élevées avec des CoeffPanicleMass de 0,30 (tableau 16). L'importance d'une grande panicule, et donc d'un grand nombre potentiel de grains, pour le rendement en grain a été soulignée par Hassan et Mohammed (2015).

Les idéotypes doivent enfin avoir une forte masse structurale et une longueur d'entre-nœud élevée de la tige. En effet, une association positive entre la hauteur de la plante et le rendement en grain a été rapportée pour le sorgho (Jordan *et al.*, 2003), probablement en raison d'une plus grande efficacité d'utilisation des rayonnements (George-Jaeggli *et al.*, 2004). En plus, si la demande en grain en assimilats dépasse la production par la photosynthèse il se produit une translocation accélérée des assimilats des tiges et des feuilles (Triboi et Triboi-Blondel, 2002).

5.5.2 Implication pour l'adaptation dans nos environnements cibles, pour les sélectionneurs et les agronomes

Cette étude a mis en évidence que la double production du sorgho pourrait être augmentée considérablement, en particulier celle de grain, dans nos environnements cibles si de nouveaux idéotypes étaient développés et mis en pratique. Rötter *et al.* (2011a) avaient déjà suggéré que pour faire face à l'adaptation dans nos environnements actuels, seuls des génotypes nouveaux visant à accroître le potentiel de rendement et la tolérance à la sécheresse, associés à des pratiques agronomiques adaptées, telles que la modification des dates de semis, la gestion adéquate des engrais azotés et la protection des plantes, permettraient de maintenir les niveaux de rendement et d'éviter des pertes.

L'utilisation de nouvelles méthodes de sélection comme la définition d'idéotype via la modélisation afin de créer des génotypes plus appropriés devrait permettre de s'adapter dans nos environnements actuels (Dawson *et al.*, 2015). Cet idéotypage nécessite une démarche *in silico* pour la conception d'idéotypes pour des utilisations définies dans un contexte donné. Ainsi, cette étude de conception d'idéotypes variétaux pour nos environnements cibles sur la base des traits d'intérêt pour la double production du sorgho, de l'historique des données météorologiques et des recommandations de la recherche (itinéraire technique) n'est qu'un exemple type pour nos environnements spécifiques. Cette démarche par simulation peut se décliner en faisant varier plein de variables d'entrée (i.e. éléments de l'itinéraire technique, sol ou climat) pour la définition d'idéotypes variétaux et cultureaux (combinaisons techniques qui impactent les traits des idéotypes). C'est ainsi, que cette étude a mis en exergue une approche novatrice et qui apparaît judicieuse pour accélérer la collaboration entre modélisateurs, agronomes (écophysiologistes), et sélectionneurs. Des programmes de sélection plus complets qui associeraient la définition d'idéotype par simulation et les méthodes de sélection actuelles pourraient sans doute permettre un raccourcissement du délai de création de nouveaux génotypes de sorgho plus adaptés à nos différents environnements.

5.5.3 Limites de l'étude

Dans cette étude, certaines limites dues à des incertitudes particulières ont été notées, soit dans la structure du modèle soit dans l'approche utilisée. En effet, dans cette étude nos environnements cibles ont été considérés comme des environnements limités seulement par les conditions pédoclimatiques « physiques » (climat, réserve hydrique du sol). On ne connaît pas la réponse de nos idéotypes à d'autres contraintes comme des teneurs limitées en azote. Dans SAMARA un module dédié à l'azote n'a pas encore été intégré. Ainsi, nous n'avons pas pu tenir compte de la limitation en azote (N) dans la conception des idéotypes. L'absorption et la redistribution de N durant la phase post-anthèse pourrait être une contrainte importante à considérer pour atteindre un plus grand potentiel de rendement de sorgho. En effet, comme noté dans cette étude, le maintien de la surface de la feuille verte pendant le remplissage du grain peut augmenter le rendement en grain du sorgho cultivé dans des conditions de limitation en eau en fin de cycle. Or l'effet de ce trait «stay-green» peut être limité par un déficit en azote (Borrell *et al.*, 1999, Muchow et Sinclair, 1994; Peng *et al.*, 1995).

Par ailleurs dans cette étude nous avons optimisé nos idéotypes en prenant comme référence le génotype Nieleni qui est de type *caudatum* et très performant. L'optimisation pouvait aussi être faite en prenant un génotype de type *guinea* comme référence ou les deux à la fois dans la mesure où les types *guinea* sont robustes, de hautes tailles en général, avec des indices de récolte faibles et sont plus adaptés a priori aux contraintes des environnements cibles alors que les *caudatum* y sont très sensibles (chapitre 2).

Dans cette étude aussi, nous avons optimisé nos idéotypes sur la base de l'historique complète disponible de données météorologiques pour les environnements cibles alors qu'il pourrait être plus judicieux d'utiliser pour la conception d'idéotypes des données climatiques futures (issues de scénarii climatiques) vu les menaces qui pèsent sur nos environnements cibles. On aurait aussi pu utiliser des données d'une période climatique plus courtes et particulière telle que par exemple celles de la période sèche 1970-1990 qui a affecté le Sahel, ou celles de la période récente de retour progressif de la pluviométrie 1990-2010 (Salack *et al.*, 2011).

Enfin une autre limite de l'étude se trouve dans l'itinéraire technique utilisé dans la conception des idéotypes. En effet, cet itinéraire étant celui recommandé par la recherche, nous n'avons pas pris en compte certains facteurs de réduction du rendement auxquels doivent faire face les producteurs (i.e. contrainte de date de semis, intrants limités ...). Ainsi, il pourrait être intéressant de mener l'étude avec un itinéraire prenant en compte les contraintes paysannes dans

le but de rendre plus efficace la conception des idéotypes pour des environnements et contextes cibles.

Toutes ces limites révèlent l'importance d'une interdisciplinarité dans la conception d'idéotypes de sorgho répondant parfaitement à une utilisation définie dans un contexte donné, et l'importance également de la modélisation comme un puissant outil intégrateurs permettant ces explorations. Cette étude n'est qu'une preuve de concept sur les potentialités de la modélisation pour des explorations d'idéotype.

5.6 Conclusion

Cette étude visait à utiliser un modèle de culture pour concevoir des idéotypes de sorgho à double production (grain et biomasse paille) performants et stables pour nos environnements cibles Bambey, Sinthiou Malem et Nioro du Rip. Les résultats ont révélé que, dans nos conditions pédoclimatiques actuelles, les idéotypes de sorgho pour la double production devraient avoir une forte capacité de colonisation du sol en profondeur par les racines, surtout dans les environnements souvent stressés en eau comme Bambey. En plus, les idéotypes devraient avoir une tige épaisse et des panicules de grande taille. L'étude a montré aussi le caractère primordial du « stay-green » c'est-à-dire de la capacité de la plante à maintenir longtemps une importante surface de feuille verte, surtout dans les zones les moins arrosées (Bambey où le CoeffLeafDeath est à 0).

Ainsi, nos idéotypes conçus peuvent être un support de réflexion pour l'augmentation de la productivité au niveau de nos environnements cibles. Les conclusions de l'étude sont potentiellement intéressantes pour les programmes de sélection du sorgho car elles font partie de la première étape pour la conception de génotypes adaptés dans un environnement cible, à savoir la définition des caractères idéotypiques à privilégier. Ainsi, nous recommandons la prise en compte de ces caractères lors de l'identification de génotypes appropriés dans les programmes de sélection du sorgho dans nos environnements cibles.

Chapitre 6 : Discussion générale

6.1 Objectif et démarche méthodologique

L'objectif du présent travail a été de développer une démarche aboutissant à la modélisation d'idéotypes variétaux adaptés et performants de sorgho, démarche qui permet donc de faciliter les choix et orientations à prendre. Un sujet ambitieux à l'interface entre l'agronomie, l'écophysiologie, la sélection et la modélisation. Par y parvenir, des approches expérimentales et de modélisation ont été combinées. Tout d'abord, des expérimentations ont été conduites en conditions semi-contrôlées (stations) à Bambey, Nioro du Rip et Sinthiou Malem durant quatre années (2013 à 2016). Le choix de ces stations s'est fait sur la base de leurs différences pédoclimatiques, ayant pour objectif de conduire ces expérimentations dans des environnements contrastés. Ces expérimentations visaient à caractériser les développements et rendements (indice de surface foliaire, biomasses, hauteurs, nombre de feuilles, rendements et composantes) de 10 géotypes contrastés de sorgho du point de vue architectural, cycle et rendements. La thèse a porté d'abord sur l'analyse des résultats de ces essais et en particulier elle a mis l'accent en détail sur les interactions géotypes-environnements et la plasticité phénotypique des principaux caractères des géotypes. Ensuite, sur la base de ces informations, la partie modélisation a consisté à caler-valider le modèle de culture SAMARA sur ces 10 géotypes étudiés. Enfin, ce travail de modélisation a permis de rechercher, via l'optimisation des paramètres, les combinaisons idéales de caractères pour différents objectifs et environnements. Pour cela, un algorithme d'optimisation génétique Rgenoud a été couplé au modèle de culture SAMARA pour la définition des idéotypes variétaux de sorgho en utilisant des données climatiques journalières de 67 ans sur nos trois sites d'études.

Cette démarche méthodologique a permis d'aboutir à des résultats intéressants notamment sur l'analyse des interactions géotypes et environnements et stabilité, la plasticité des caractères d'intérêt potentiel et leurs combinaisons idéales pour la double production. Il sera présenté dans un premier temps, les principaux résultats obtenus, puis sera abordé dans un deuxième temps les limites du travail et les perspectives qui peuvent lui être données.

6.2 Principaux résultats obtenus

Nos travaux ont montré que (chapitre 2), les rendements en grains et biomasses pailles ont fortement été influencés par les génotypes, les environnements et l'interaction génotype-environnement comme l'on montré nombre d'études sur le sorgho (Filho *et al.*, 2014 ; Showemimo *et al.*, 2000). Les environnements ont provoqué des réponses différentes des génotypes et la plupart des génotypes a montré une spécificité environnementale (figures 8 & 9). 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 résultats ont mis en évidence aussi (1) l'aptitude des génotypes Nieleni et Fadda au double usage dans la majorité des environnements et dans une moindre mesure la même aptitude pour les génotypes Pablo et IS15401 (figure 10) ; et (2) qu'une date de semis précoce est bénéfique pour l'expression de l'aptitude au double usage. De plus, les résultats ont indiqué que les variétés Nieleni, Fadda, et Pablo sont les plus performantes en termes de grains, indépendamment des conditions de cultures Ce résultat rejoint ceux de différents auteurs (Rattunde *et al.*, 2013 ; House *et al.*, 1997; Hausmann *et al.*, 1998) concernant la « supériorité » des hybrides *guinea*. La variété témoin sénégalaise 621B apparaît comme ayant un très bon potentiel, car elle peut produire plus de 3 tonnes à l'hectare dans de bonnes conditions agro-pédologiques comme celles de Sinthiou Malem en 2016, mais elle se révèle comme étant particulièrement sensible aux conditions de culture, en particulier aux conditions de sol. Ces résultats nous conduisent à recommander les variétés Fadda et Nieleni pour nos régions d'étude.

Les résultats sur la plasticité phénotypique des caractères contributifs aux types de production (chapitre 3) ont mis en évidence trois types de plante en fonction de la production visée : des types pour la production de biomasse, SK5912 et IS15401, à cycle long, à forte surface foliaire, et à taille et épaisseur de la tige élevées ; les types pour la production de grain (F2-20, 621B et Soumba) à grande feuille et nombre de grains par panicule élevé ; et les types pour la double production (Fadda, Nieleni et Pablo) qui ont combiné un ensemble de caractères favorables à cela, à savoir NFV, DIAM, LEN et NGP (figure 11). Il ressort de cette étude que certains caractères souhaitables avaient été fortement influencés par l'environnement (forte plasticité phénotypique), comme le TAL, le NGP, LAI et LEN, qui s'expriment mieux dans les environnements à bonnes conditions agropédoclimatiques comme Sinthiou Malem. D'autres caractères ont par contre été relativement peu influencés par l'environnement (faible plasticité), ce qui les rend facilement exploitables en sélection : PMG, LOFD, LAFD et NFA et DIAM. Nos résultats ont aussi mis en exergue que la stabilité de la phénologie, de la taille de feuille et

du nombre de grains par panicule est associée à un rendement grain élevé stable, et que celle de l'épaisseur de la tige l'est à un rendement en biomasse paille élevé et stable.

SAMARA a été capable de reproduire la plasticité phénotypique de la phénologie (RRMSE entre de 7 % et 9 %), du développement des feuilles et des dynamiques foliaires et de croissance en hauteur de la plante (RMAE inférieure à 30 %), ce en référence à notre ensemble de données observées dans les divers environnements et à leurs incertitudes (chapitre 4). Cependant une sur-estimation par le modèle des biomasses des tiges et biomasses totales a été observée pour la plupart des génotypes. Une sur-estimation systématique du rendement en biomasse paille a également été notée, particulièrement pour F2-20, Soumba et SK5912, à cause sans doute de la non prise en compte de la sénescence terminale des feuilles, qui est dépendante de la fourniture d'azote, car le modèle ne tient pas compte (ne simule pas) de celle-ci. Les résultats de la calibration et évaluation du rendement en grains et nombre de grains par panicule ont été aussi globalement peu satisfaisants. Les résultats de la calibration ont montré que les paramètres *CoeffInternodeMass*, *TilAbility*, *InternodeLengthMax* et *SlaMin* ont été les plus variables. Ils ont donc confirmé la plasticité phénotypique observée au chapitre 3 sur les traits de production de talles, de surface foliaire et de longueur d'entre-nœuds. La capacité de SAMARA à reproduire la plasticité phénotypique a été déjà observée sur le riz (Kumar *et al.* (2016). Ainsi, le modèle se présente comme un puissant outil d'analyse de la plasticité phénotypique susceptible d'aider les programmes d'amélioration à rationaliser leurs schémas et à augmenter ainsi l'efficacité de leurs travaux.

L'idéotype développé *in silico* a montré qu'une augmentation substantielle des rendements pour la double production (grains et biomasse) est possible dans les environnements cibles étudiés (Bambey, Nioro du Rip et Sinthiou Malem) via l'optimisation des paramètres génétiques de l'idéotypes telle que réalisée par le couplage SAMARA-Rgenoud (chapitre 5). L'idéotype conçu a été plus performant que Nieleni pour la double production dans les environnements de Sinthiou Malem et Nioro du Rip alors que pour Bambey il ne s'est révélé meilleur que Nieleni que pour le rendement en grains (figure 26). De plus les résultats de l'étude ont mis en exergue que les caractères tels que la longueur maximale des racines, le « stay-green », la longueur d'entre-nœuds, les masses structurales de la tige et de la panicule devraient être considérés dans l'identification d'idéotypes pour les environnements cibles.

6.3 Insuffisances du travail

Cette étude a contribué à l'amélioration variétale du sorgho au Sénégal à travers une méthodologie intégrant expérimentation, compréhension des mécanismes, et modélisation, pour la définition d'idéotypes de sorghos double-usages adaptés et performants. Cependant, comme toute étude, elle présente des limites. En effet, les données des essais initiés en milieu paysan en 2014 et 2015 pour l'évaluation par les paysans et la promotion de ces géotypes double-usages n'avaient pu être prises en compte en raison de leurs mauvaises qualités liées à des difficultés techniques et de gestion. Ces essais avaient pour objectif de recueillir les appréciations des agriculteurs et évaluer l'intérêt, de leurs points de vue, des différents géotypes étudiés et faire connaître ces nouvelles variétés de sorghos des paysans et autres acteurs techniques et économiques via des ateliers et communications sur la qualité des pailles et grains, notamment pour l'agro-industrie. Ainsi, nos recommandations concernant les choix variétaux de sorgho double-usages (idéotypes) ont été uniquement faites sur la base de nos résultats scientifiques. Par ailleurs, la caractérisation de la composition biochimique des biomasses (tiges et grains) pour l'évaluation de leur qualité n'a pu être faite. La collecte d'échantillons initiés en 2013 et 2014 pour des analyses en spectroscopie proche infra-rouge (SPIR) et en chimie humide n'avait pu être conduite à terme en raison d'un manque d'une expertise locale surtout pour les analyses SPIR. Ces échantillons devraient être acheminés au CIRAD en France. Une autre insuffisance réside dans la caractérisation approfondie du fonctionnement et potentiel des géotypes étudiés. En effet, nous n'avons pu aller plus loin avec des mesures d'écophysiologiques notamment des paramètres de photosynthèse dans le but (i) d'étudier la variabilité des paramètres impliqués dans les processus de photosynthèse, au sein de nos géotypes de sorgho contrastée et (ii) d'améliorer la prédiction des modèles de culture en apportant une meilleure connaissance des paramètres clefs de la photosynthèse. SAMARA a bien reproduit la plasticité phénotypique des caractères d'intérêt potentiel des sorghos double-usages étudiés. Cependant, il ne parvient à reproduire la variation dans la réalité des rendements finaux des géotypes étudiés (interactions géotype et environnements) lorsqu'on sort de son domaine de validité (maladies et carences notamment azotée survenues durant nos expérimentations). Il serait opportun de revoir les codes ou algorithmes du modèle en implémentant un module de l'azote afin d'améliorer la simulation des interactions géotypes et environnements.

Conclusion et Perspectives

Conclusion générale

Situé en grande partie dans la zone soudano-sahélienne, le Sénégal est soumis à un climat de type semi-aride tropical fortement affecté par la variabilité importante (inter- et intra-annuelle) de la pluviométrie qui rend difficiles les choix variétaux et d'itinéraires. Dans ce contexte risqué et qui devrait le devenir encore plus du fait du changement climatique, le sorgho a une place plus importante à y prendre car il n'y est pour le moment que très peu cultivé comparativement au Mali et au Burkina Faso malgré sa grande diversité phénotypique et ses usages très divers. Mais la question qui se pose est comment choisir de nouvelles variétés de sorgho à introduire ou décider de celles à développer par la sélection, qui soient bien adaptées aux conditions locales tout en présentant des caractéristiques d'intérêt ? Pour tenter de contribuer à cet enjeu l'objectif global de cette thèse était de développer une démarche aboutissant à la modélisation d'idéotypes variétaux adaptés et performants de sorgho, démarche qui permet donc de faciliter les choix et orientations à prendre. Elle pourrait être utilisée pour raisonner des choix variétaux en relation aux environnements et usages.

Les résultats ont montré une très forte variabilité des rendements en grains et biomasses paille à travers les environnements et la plupart des géotypes a montré une spécificité environnementale. Les meilleures productions en grains ont été obtenues avec Nieleni et Fadda tandis que pour la biomasse IS15401 et SK5912 ont enregistré les valeurs les plus élevées. Les hybrides Nieleni et Fadda ont été les plus aptes pour la double production et que pour l'expression du double-usage, un semis précoce est avantageux. La variété 621B (témoin sénégalaise) s'est montrée très productive dans de bonnes conditions agro-pédologiques (Sinthiou Malem en 2016), mais elle témoigne une sensibilité aux conditions de culture (surtout le sol). Ces résultats nous conduisent à recommander les variétés Fadda et Nieleni pour nos régions d'étude.

Trois types de plante en fonction de la production visée ont été identifiés : des types pour la production de biomasse, SK5912 et IS15401, à cycle long, à forte surface foliaire, et à taille et épaisseur de la tige élevées ; les types pour la production de grain (F2-20, 621B et Soumba) à grande feuille et nombre de grains par panicule élevé ; et les types pour la double production (Fadda, Nieleni et Pablo) qui ont combiné un ensemble de caractères favorables à cela. Certains caractères recherchés ont été fortement plastiques alors que d'autres ont été faiblement plastique. Un rendement grain élevé stable est lié à une stabilité de la phénologie, de la taille de feuille et du nombre de grains par panicule, et celui de la biomasse l'est pour une épaisseur de la tige stable.

Le modèle de culture SAMARA a bien reproduit la plasticité phénotypique de la phénologie, du développement des feuilles et des dynamiques foliaires et de croissance en hauteur de la plante. Cependant, il a montré quelques faiblesses dans la simulation des biomasses avec une sur-estimation de celles-ci. La calibration et évaluation du rendement en grains et nombre de grains par panicule ont été aussi globalement peu satisfaisantes. Les paramètres *CoeffInternodeMass*, *TilAbility*, *InternodeLengthMax* et *SlaMin* ont été les plus variables confirmant la plasticité phénotypique des caractères observés. Ainsi, l'intérêt le plus marquant de ce modèle réside dans sa capacité à reproduire la plasticité phénotypique des caractères du sorgho dans une multitude d'environnements.

Son utilisation en le couplant à un algorithme d'optimisation génétique Rgenoud pour la définition d'un idéotype montre qu'une augmentation substantielle des rendements pour la double production (grains et biomasse) est possible dans les environnements cibles étudiés (Bambey, Nioro du Rip et Sinthiou Malem). Les caractères tels que la longueur maximale des racines, le « stay-green », la longueur d'entre-nœuds, les masses structurale de la tige et de la panicule devraient être considérés dans l'identification d'idéotypes pour les environnements cibles.

Perspectives

A l'issue de cette thèse, des génotypes double-usage performants, c'est-à-dire capables d'avoir de bons rendements en grains et en biomasse paille, ont été identifiés. Ils peuvent se prêter à plusieurs usages, en particulier pour les alimentations humaines et animales. En lien avec cette double aptitude et pour une (encore) meilleure valorisation du grain et de la biomasse en alimentation animale et humaine, il serait intéressant de considérer aussi la qualité des biomasses des tiges, en regardant en particulier la composition des tissus des entrenœuds des génotypes identifiés, et également la qualité des grains. Pour cela, et dans le cadre des mêmes types d'essais, on pourrait réaliser des analyses biochimiques sur des échantillons pris au cours du cycle et à la récolte, et s'intéresser à différents caractères d'intérêt tels que la digestibilité de la tige (via des indicateurs comme la composition en fibres, en protéines, et en tanins) ou tels que la teneur en équivalent « bioéthanol » (par la détermination de la composition en sucres solubles ou de réserves). Dans cette optique la spectroscopie proche infrarouge (SPIR) pourrait être mise en œuvre.

Il pourrait être intéressant de coupler aussi aux caractérisations agro-morphologiques du fonctionnement et des potentialités des génotypes, des mesures écophysiological plus fines permettant une meilleure compréhension de leur fonctionnement, ce en milieu contrôlé et aussi en milieu réel, afin de quantifier les effets des contraintes environnementales, en particulier hydriques, sur les génotypes. Par exemple on pourrait étudier leur photosynthèse avec un appareil sophistiqué comme le Li-Cor 6400 qui donne plusieurs types d'informations (Gm : Conductance du mésophylle pour le CO₂, J_{max} : Densité maximale du flux d'électrons photosynthétiques, V_{cmax} : Vitesse maximale de carboxylation et TPU : taux de régénération de phosphates lors de l'utilisation des trioses-phosphates), et compléter ces données par des mesures de fluorescence chlorophyllienne.

Enfin il serait intéressant de valoriser notre travail de calibration-validation de SAMARA sur 10 génotypes contrastés par la définition d'environnements cibles (*Target Population of Environments*) en Afrique de l'Ouest, en lien en particulier avec les risques hydriques. Pour cela le modèle SAMARA calibré devrait être couplé à une base de données climatiques couvrant l'ensemble de l'Afrique de l'Ouest pour pouvoir identifier ensuite via des jeux de simulations l'importance des contraintes hydriques pour chaque génotype partout dans la sous-région, et par suite les zones d'adaptation de chacun.

Références bibliographiques

- Abdalla, H. A., 1991. Evaluation of exotic and local parental lines of sorghum (*sorghum bicolor* L.Moench) and their F1 hybrid at different environments .M.SC.Thesis (Agri.) University of hartoum.
- Abifarin, A.O., Pickett, R. C., 1970. Combining ability and hetrosis for yield, protein lysine and certain plant characters in 18 divers inbreds and 65 hybrids in (*sorghum bicolor* (L.) Moench). *African Soil*. 15: 399 - 416.
- Agrama, H.A., 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.
- Agrawal, A.A., 2001. Phenotypic plasticity in the interactions and evolution of species. *Science*. 294: 321-326.
- Akhond, M.A.Y., Amiruzzaman, M., Bhuiyan, M.S.A., Uddin, M.N., Hoque, M.M., 1998. Genetic parameters and character association in grain sorghum. *Bangladesh J. Agril. Res.*, 23: 247-254.
- Akinseye, F. M., Adam, M., Agele, S. O., Hoffmann, M., Traore, P., Whitbread, A. M., 2017. Assessing crop model improvements through comparison of sorghum (*sorghum bicolor* L. moench) simulation models: a case study of West African varieties *Field Crop. Res*. 201: 19-31.
- Alagarswamy, G., Ritchie, J.T., 1991. Phasic development in CERES-Sorghum model. In: T. Hodges (ed.), *Predicting Crop Phenology*. CRC Press, Boca Raton, FL, pp. 143-152.
- 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.
- ANSD (Agence Nationale de la Statistique et de la Démographie), 2018. Bulletin Mensuel des Statistiques Economiques de 2018. Division des Statistiques Economiques. Ministère de l'Economie, des Finances et du Plan, Sénégal, 109 p.
- Awan, Z.K., Naseem, Z., Masood, S.A., Nasir, B., Sarwar, F., Amin, E. and Qurban, A., 2015. How to improve Sorghum bicolor (L.) Moench production: An Overview. *Life Sci J*. 12(3s): 99-103.
- Ayana, A., Bryngelsson, T., Bekele, E., 2000. Genetic variation of Ethiopian and Eritrean Sorghum (*Sorghum bicolor* (L) Moench) germplasm assessed by random amplified polymorphic DNA (RAPD). *Genet Resour Crop Evol*. 47:471-481.
- Ba, K., Tine, E., Destain, J., Cissé, N., Thonart, P., 2008. 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.
- Bakheit, B. R., 1990. Variability and correlation in grain sorghum genotypes (*Sorghum bicolor* L.Moench) under drought conditions at different stages of growth. *J. Agron. & Crop Sci*. 164:355-360.
- Balme, M., Galle, S., Lebel, T., 2005. Démarrage de la saison des pluies au Sahel : variabilité aux échelles hydrologique et agronomique, analysée à partir des données EPSAT-Niger. *Sécheresse*. 16 (1): 15-22.
- Balole, T.V., Legwaila, G.M., 2006. Sorghum bicolor (L.) Moench. [En ligne] Fiche de Protabase. Brink, M. & Belay, G. (Editeurs). PROTA (Plant Resources of Tropical

Africa / Ressources végétales de l'Afrique tropicale), Wageningen, Pays Bas. Disponible sur < <http://database.prota.org/recherche.htm>>.

- Baret, F., 1980. Caractérisation hydrodynamique d'un sol de la région de Nioro. ISRA, 1980.
- Baron, C., Sultan, B., Balme, M., Sarr, B., Traoré, S., Lebel, T., Janicot, S., Dingkuhn, M., 2005. From GCM grid cell to agricultural plot: scale issues affecting modelling of climate impact. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 360: 2095–2108.
- Barro-Kondombo, C.P., Vom Brocke, K., Chantereau, J., Sagnard, F., Zongo, J.D., 2008. Variabilité phénotypique des sorghos locaux de deux régions du Burkina Faso : la Boucle du Mouhoun et le Centre-Ouest. *Cahiers Agricultures*. 17 (2) : 107-113.
- Barro-Kondombo, C., Sagnard, F., Chantereau, J., Deu, M., Vom Brocke, K., Durand P., Gozé, E., Zongo, J.D., 2010. Genetic structure among sorghum landraces as revealed by morphological variation and microsatellite markers in three agroclimatic regions of Burkina Faso. *Theor Appl Genet*. 120(8):1511-23.
- Bartlett, M. S., 1937. Properties of sufficiency and statistical tests. *Proceedings of the Royal Statistical Society*. Series A. 160: 268–282.
- Bazile, D., Soumare, M., 2004. Gestion spatiale de la diversité variétale en réponse à la diversité écosystémique : le cas du sorgho [*Sorghum bicolor* (L) Moench] au Mali. *Cahiers Agricultures*. (13) : 480-487.
- 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.
- BBCH, 2001. Stades phénologiques des mono-et dicotylédones cultivées 2. Édition, 2001. Rédigé par Uwe Meier. Centre Fédéral de Recherches Biologiques pour l'Agriculture et les Forêts. 166 p.
- Belliard, J., 1982. Analyse génétique et physiologique du système de contrôle photopériodique de la floraison chez le mil africain. Université de Paris- Sud, Orsay Doctorat d'état. 120p.
- Bello, D., Kadams A.M., Simon, S.Y., Mashi, D.S., 2007. Studies on genetic variability in cultivated sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) cultivars of Adamawa State Nigeria. *American-Eurasian J. Agric. Environ. Sci*. 2(3): 297-302.
- Belton, P.S., Taylor, J.R.N., 2004. Sorghum and millets: protein sources for Africa. *Trends Food Sci. Technol*. 15: 94–98.
- Bloomfield, J.A., Rose, T.J., King, G.J., 2014. Sustainable harvest: managing plasticity for resilient crops. *Plant Biotechnol. J*. 12, 517–533.
- Borrell, A.K., Bidinger, F.R., Sunita, K., 1999. Stay-green trait associated with yield in recombinant inbred sorghum lines varying in rate of leaf senescence. *Int. Sorghum Millets Newsllett*. 40: 31–34.
- Borrell, A.K., Hammer, G.L., Henzell, R.G., 2000b. Does Maintaining Green Leaf Area in Sorghum Improve Yield under Drought? II. Dry Matter Production and Yield. *Crop Sci*. 40: 1037–1048.
- Borrell, A.P., Andrew, H., Hash, C., Tom, B., Claire, J., David, R., Lespinasse, Denis, Weltzien, E., Rattunde, H., Fred, W., Upadhyaya, H.D., Glaszmann, J.C., Rami, J.F., Vaksman, M., Teme, N., Niangado, O., Ramu, P., Senthilvel, S.D., Santosh, P., Bouchet, S.,

- Kresovich, S., 2010. A GCP Challenge Initiative: Drought Tolerance Improvement for Sorghum in Africa. In: Abstracts for the Plant & Animal Genome XVIII Conference. Plant & Animal Genome XVIII Conference, San Diego, CA, U.S.A., (). 9-13 January 2010.
- Bouman, B.A.M., Van Laar, H.H., 2006. Description, evaluation of the rice growth model ORYZA 2000 under nitrogen-limited conditions. *Agric. Syst.* 87: 249–273.
- Bradshaw, A.D., 1965. Evolutionary significance of phenotypic plasticity in plants. *Adv. Genet.* 13: 115–155.
- Calviño, M., Messing, J., 2012. Sweet sorghum as a model system for bioenergy crops. *Curr. Opin. Biotechnol.* 23: 323–329.
- Callahan, H.S., Pigliucci, M., Schlichting, C.D., 1997. Developmental phenotypic plasticity: where ecology and evolution meet molecular biology. *Bioessays.* 19: 519-525.
- Cargnelutti Filho, A., Perecin, D., Malheiros, E.B., and Guadagnin, J.P., 2007. Comparação de métodos de adaptabilidade e estabilidade relacionados à produtividade de grãos de cultivares de milho. *Bragantia.* 66: 571-578.
- Casadebaig, P., Debaeke, P., 2011. Using a crop model to assess genotype-environment interactions in multi-environment trials. In Halford N, Semenov M, eds. System approaches to crop improvement. *Aspects Appl Biol.* 107: 19-25.
- Chambel, M.R., Climent, J., Alía, R., Valladares, F., 2005. Phenotypic plasticity: a useful framework for understanding adaptation in forest species. *Invest Agrar Sist Recur For.* 14: 334–344.
- Chantereau, J., Nicou, R., 1994. Sorghum. The tropical Agriculturist Seres. CTA Wageningen, Netherlands; Macmillan, London Pmid: 24186186.
- Chepng'etich, E., Bett, E.K., Nyamwaro, S.O., Kizito, K., 2014. Analysis of Technical Efficiency of Sorghum Production in Lower Eastern Kenya: A Data Envelopment Analysis (DEA) approach. 5 : 58–65.
- Chopart J. L., 1980. Etude au champ des systèmes racinaires des principales cultures pluviales du Sénégal. Thèse de Doctorat d'Université, Toulouse, 159 p. + 45 p. ann.
- Cissé, N., 2001. La culture de sorgho au Sénégal. In: Comas J., MacPherson H.G. eds. La culture du sorgho de décrue en Afrique de l'Ouest et du Centre: Situation actuelle et définition d'un Plan d'Action Régional, AEI, FAO, pp 111-121.
- Clerget, B., 2004. Le rôle du photopériodisme dans l'élaboration du rendement de trois variétés de sorgho cultivées en Afrique de l'Ouest. Thèse de doctorat : agronomie, Ecole Doctorale ABIÉS, Institut National Agronomique Paris-Grignon. 103 p.
- Combres, J.-C., Pallas, B., Rouan, L., Mialet-Serra, I., Caliman, J.-P., Braconnier, S., Soulié, J.-C., Dingkuhn, M., 2013. Simulation of inflorescence dynamics in oil palm and estimation of environment-sensitive phenological phases: a model based analysis. *Funct. Plant Biol.* 40: 263–279.
- Crossa, J., 1990. Statistical analyses of multilocation trials. *Adv Agron.* 44: 55-85.
- 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.
- Dabholkar, A. R., Telang, S. W. and Patal, K. C., 1970. Correlations in sorghum hybrids. *Sci. Cult.* 36: 466.

- Dahlberg, J., Berenji, J., Sikora, V., Latković, D., 2011. Assessing sorghum [*Sorghum bicolor* (L) Moench] germplasm for new traits: Food, fuels & unique uses. *Maydica* 56, 85–92.
- Snowden, J., 1936. *The cultivated races of sorghum*, Adlard, UK. Ed.
- Dawson, I.K., Russell, J., Powell, W., Steffenson, B., Thomas, B., Waugh, R., 2015. Barley: a translational model for adaptation to climate change. *New Phytol.*206: 913–931.
- Debaeke, P., Quilot-Turion, B., 2014. Conception d'idéotypes de plantes pour une agriculture durable. Collection École-chercheurs INRA FormaSciences FPN INRA, 252 p.
- Dehaynin, N., 2007. Utilisation du sorgho en alimentation animale. Thèse de doctorat : Vétérinaire. Ecole nationale vétérinaire de Lyon. Université Claude-Bernard - Lyon 1. 108p.
- Dejong, G., 1995. Phenotypic plasticity as a product of selection in a variable environment. *American Naturalist*, 145: 493-512.
- Deu, M., Sagnard F., Chantereau, J., Calatayud, C., Vigouroux, Y., Pham, J. L., Mariac, C., Kapran, I., Mamadou, A., Gérard, B., Ndjeunga, J., Bezançon, G., 2010. Spatiotemporal dynamics of genetic diversity in *Sorghum bicolor* in Niger. *Theoretical and Applied Genetics*. 120 (7): 1301-1313.
- Dewitt T.J., Sih, A. and Wilson, D.S., 1998. Costs and limits of phenotypic plasticity. *Trends in Ecology and Evolution*. 13: 77-81.
- Dicko, M.H., Gruppen, H., Traore, A.S., Voragen, A., Berkel, W., 2006. Sorghum grain as human food in Africa: relevance of content of starch and amylase activities. *African Journal of Biotechnology*. 5: 384-395.
- Dingkuhn, H.F., Schnier, S.K., De Datta, K., Dörffling, C., Javellana, R., 1990. Nitrogen fertilization of direct-Seeded flooded vs. transplanted rice: ii. Interactions among canopy properties. *Crop Sci.* 30: 1284–1292.
- Dingkuhn, M., Luquet, D., Quilot, B., De Reffye, P., 2005. Environmental and genetic control of morphogenesis in crops: towards models simulating phenotypic plasticity. *Aust. J. Agric. Res.* 56: 1289–1302.
- Dingkuhn, M., Luquet, D., Kim, H.K., Tambour, L., Clément-Vidal, A., 2006. Ecomeristem, a model of morphogenesis and competition among sinks in rice: 2. Simulating genotype responses to phosphorus deficiency. *Funct. Plant Biol.*33, 325–337.
- Dingkuhn, M., Singh, B.B., Clerget, B., Chantereau, J., Sultan, B., 2006. Past, present and future criteria to breed crops for water-limited environments in West Africa *Agric. Water Manag.* 80: 241–61.
- Dingkuhn, M., Luquet, D., Clément-Vidal, A., Tambour, L., Kim, H.K., Song, Y.H., 2007. Is plant growth driven by sink regulation? Implications for crop models, phenotyping approaches and ideotypes. In: Spiertz, J.H.J., Struik, P.C., Van Laar, H.H. (Eds.), *Scale and Complexity in Plant Systems Research. Gene-Plant-Crop Relations*. Springer, Dordrecht, The Netherlands, pp. 157–170.
- Dingkuhn, M., Pasco, R., Soulie, J.C., 2013. SAMARA V2.1: Model description and guidelines for calibration, 28 pp.
- Diop M., 1996. A propos de la durée de la saison des pluies au Sénégal. *Sécheresse*, vol.1 n°1, 7-15.

- Djè, Y., Heuertz, M., Ater M., Lefebvre, C., Vekemans, X., 2007. Evaluation de la diversité morphologique des variétés traditionnelles de sorgho du Nord-ouest du Maroc. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* 11 (1): 39-46.
- Donald, C. M., 1962. In search of yield. *J. Aust. Inst. Agric. Sci.* 28: 171-178.
- Donald, C.M., 1963. Competition among crop and pasture plants. *Adv. Agron.* 15: 1–118.
- Donald, C.M., 1968. The breeding of crop ideotypes. *Euphytica* 17, 385–403.
- Dornbusch, T., Baccar, R., Watt, J., Hillier, J., Bertheloot, J., Fournier, C., Andrieu, B., 2011. Plasticity of winter wheat modulated by sowing date, plant population density and nitrogen fertilization: dimensions and size of leaf blades, sheaths and internodes in relation to their position on a stem. *Field Crops Res.* 121: 116 –124.
- Durufle G., 1996. Tendances, contraintes et perspectives de l'Agriculture sénégalaise. Document de réflexion stratégique. ENGR, Outremont, Québec H2V 3J7, Canada, 104 p.
- EL, Naim, A.M, Ibrahim, M.I., Mohammed, E.A., Elshiekh, A.I., 2012. Evaluation of Some Local Sorghum (*Sorghum Bicolor* L. Moench) Genotypes in Rain-Fed. *International Journal of Plant Research.* 2(1):15-20.
- Ellis, R. H., Qi, A., Craufurd, P. Q., Summerfield, R. J., Roberts, E. H., 1997. Effects of photoperiod, temperature and asynchrony between thermoperiod and photoperiod on development to panicle initiation in sorghum. *Annals of Botany.* 79: 169-178.
- Erickson, J.E., Helsel, Z.R., Woodard, K.R., Vendramini, J.M.B., Wang, Y., Sollenberger, L.E., Gilbert, R.A., 2011. Planting date affects biomass and Brix of sweet sorghum grown for biofuel across Florida. *Agron. J.* 103:1827–1833.
- Espinosa-Ramírez, J., Pérez-Carrillo, E., Serna-Saldívar, S.O., 2014. Maltose and glucose utilization during fermentation of barley and sorghum lager beers as affected by β -amylase or amyloglucosidase addition. *J. Cereal Sci.* 60: 602–609. doi:10.1016/j.jcs.2014.07.008.
- Evers T. & Millar S., 2002. Cereal grain structure and development: some implications for quality. *J. Cereal Sci.*, 36, 261-284.
- Ewert, F., Rodriguez, D., Jamieson, P., Semenov, M., Mitchell, R., Goudriaan, J., Porter, J., Kimball, B., Pinter, P., 2002. Effects of elevated CO₂ and drought on wheat: testing crop simulation models for different experimental and climatic conditions. *Agric. Ecosyst. Environ.* 93: 249–266.
- FAO, 1995. Le sorgho et les mils dans la nutrition humaine. Rome : FAO, 198p. Disponible sur <http://www.fao.org/docrep/T0818F/T0818F00.htm>
- FAO, 2009. How to feed the World in 2050. FAO, Rome.
- FAO, 2011. Aperçu du développement rizicole au Sénégal. Division de la production végétale et de la protection des plantes (AGP) de la FAO. Bureau Afrique de l'Ouest. Dakar. Sénégal. 10 p.
- FAOSTAT, 2015. Statistiques des données année 2015, Rome, Italy. United Nations Food and Agriculture Organization, Rome.
- FAOSTAT, 2016. Trade data base, Production data. <https://faostat.fao.org>. URL <https://faostat.fao.org> (accessed 9.18.18).

- Feng, L., Bouman B. A. M., Tuong, T. P., Cabangon, R. J., Li, Y., Lu, G., Feng, Y., 2007. Exploring options to grow rice using less water in northern China using a modeling approach, I: Field experiments and model evaluation. *Agricultural Water Management*. 88:1–13.
- Ferreira, D.F.; Demétrio, C.G.B.; Manly, B.F.J.; Machado, A.A.; Vencovsky, R., 2006. Statistical models in agriculture: biometrical methods for evaluating phenotypic stability in plant breeding. 12: 373–388.
- Fischer, R.A., 1993. Irrigated spring wheat and timing and amount of nitrogen fertilizer. II. Physiology of grain yield response. *Field Crops Res.* 33: 57–80.
- Fliedel, G., Ouattara, M., Grabulos, J., Drame, D., Cruz, J.F., 2004. Effet du blanchiment mécanique sur la qualité technologique, culinaire et nutritionnelle du fonio, céréale d’Afrique de l’Ouest. In : *Voies alimentaires d’amélioration des situations nutritionnelles en Afrique de l’Ouest : le rôle des technologues alimentaires et des nutritionnistes, actes du 2e Atelier international* (D. Brouwer Inge, S. Traoré Alfred et S. Trèche, eds), 23-28 novembre 2003, Ouagadougou, Presses universitaires de Ouagadougou, Burkina Faso, 599- 614.
- Frey, K. J., 1970. Improving crop yields through plant breeding. In: R. MUNSON (Ed.), *Moving off the yield plateau*. Spec. Publ. ~ 20 of Am. Soc. Agron., Madison, Wis. pp. 15 58.
- 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.
- Gauffreteau, A., 2018. Using ideotypes to support selection and recommendation of varieties. *OCL*. 25(6) : D602.
- Gençer, A., Şahin, M., 2015. Identifying the Conditions Required for the NaOH Method for Producing Pulp and Paper from Sorghum Grown In Turkey. *Bio Resources*. 10: 2850–2858.
- George-Jaeggli, B., Broad, I., Hammer, G.L., Jordan, D., 2004. Is increased radiation use efficiency in sorghum related to increased height? In: Fischer, T., et al. (Eds.), *New Directions for a Diverse Planet: Proceedings for the 4th International Crop Science Congress*. Brisbane, Australia, 26 September–1 October 2004
- Gerik, T.J., Rosenthal, W.D., Vanderlip, R.L., Wade, L.J., 2004. Simulating seed number in grain sorghum from increases in plant dry weight. *Agron. J.* 96 : 1222–1230.
- Gerstenmier, A., Choho, T., 2015. *Fourniture d’intrants agricoles*. Dakar (Sénégal).
- Gremy, D. 2006. L’ensilage de sorgho démontre son efficacité. *L’Eleveur laitier* 36, 134p.
- Gutjahr, S., Vaksmann, M., Dingkuhn, M., Thera, K., Trouche, G., Braconnier, S., Luquet, D., 2013b. Grain, sugar and biomass accumulation in tropical sorghums. I. Trade-offs and effects of phenological plasticity. *Funct. Plant Biol.* 40: 342–354.
- Habindavyi, E., 2009. *Morphological characterization of sorghum diversity in Burundi diversity*. Uppsala University.
- Halkier, B.A., Moller, B.L., 1989. Biosynthesis of the Cyanogenic Glucoside Dhurrin in Seedlings of *Sorghum bicolor* (L.) Moench and Partial Purification of the Enzyme System Involved *Plant Physiol.* 90, (4): 1552-1559.

- Hamon, G., 1978. Caractérisation hydrodynamique in situ d'un sol de culture en moyenne Casamance. 1978.
- Hamon, G., 1980. Mise en œuvre et critique des méthodes de caractérisation hydrodynamique de la zone non saturée du sol. Application aux sols de culture du Sénégal. Thèse de Doct. Ing. Inst. de Mécanique, Grenoble, 136 pp.
- Hammami, Z., Gauffreteau, A., Belhaj Fraj, M., Sahli, A., Jeuffroy, M.H., Rezgui, S., Bergaoui, K., McDonnell, R., Trifa, Y., 2017. Yield reduction in improved barley (*Hordeum vulgare* L) varieties and landraces under salinity using selected tolerance traits. *Field Crop Res.* 211: 10-18.
- Hammer, G. L., Kropff, M.J., Sinclair, T.R., Porter, J.R., 2002. Future contributions of crop modelling – from heuristics and supporting decision making to understanding genetic regulation and aiding crop improvement. *Eur. J. Agron.* 18:15–31.
- Hammer, G., Cooper, M., Tardieu, F., Welch, S., Walsh, B., van Eeuwijk, F., et al., 2006. Models for navigating biological complexity in breeding improved crop plants. *Trends Plant Sci.* 11:587–593.
- Hammer, G. L., van Oosterom, E., McLean, G., Chapman, S.C., Broad, I., Harland, P., et al., 2010. Adapting APSIM to model the physiology and genetics of complex adaptive traits in field crops. *J. Exp. Bot.* 61:2185–2202.
- Harvey, M., Pilgrim, S., 2011. The new competition for land: Food, energy, and climate change. *Food Policy.* 36: S40–S51.
- Hansen, J.W., 2002. Realizing the potential benefits of climate prediction to agriculture: issues, approaches, challenges. *Agric. Syst.* 74, 309–330.
- Hassan, A. E., 2005. Effect of plant population on grain yield of sorghum in South Kordofan. Proceedings of the Meetings of the National Crop Husbandry Committee 37th (2005), Agri-cultural Research Corporation (ARC) – Sudan, pp: 6-13.
- Hassan, S.A., and Mohammed, M.I., 2015. Breeding for dual purpose attributes in sorghum: Identification of materials and associations among fodder and grain yield and related traits. *J. Plant Breed. Crop Sci.* 7: 94–100.
- Hausmann, B.I.G., A.B. Obilana, A.B., Blum, A., Ayiecho, P.O., Schipprack, W. and Geiger, H.H., 1998. Hybrid performance of sorghum and its relationship to morphological and physiological traits under variable drought stress in Kenya. *Plant Breed.* 117: 223–229.
- Hausmann, B.I.G., Mahalakshmi, V., Reddy, B.V.S., Seetharama, N., Hash, C.T., Geiger, H.H., 2002. QTL mapping of stay-green in two sorghum recombinant inbred populations. *Theor. Appl. Genet.* 106: 133–142.
- Herder, G. D., Van Isterdael, G., Beeckman, T., De Smet, I., 2010. The roots of a new green revolution. *Trends Plant Sci.* 15:600–607.
- Holts, T., 1995. Analysis of genotype environment interactions. *South Afric J Sci.* 91: 121-124.
- House, L.R., 1987. Manuel pour la sélection du sorgho. Deuxième édition. Patancheru (Inde) : International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics (ICRISAT). 229 p.
- Chantereau, C., Nicou, R., 1991. Le sorgho. *Le technicien d'agriculture tropical.* ACCT-Paris, CTA- wageningen. 159p.

- House, L.R., Verma, B.N., Ejeta, G., Rana, B.S., Kapran, I., Obilana, A.B. and Reddy, B.V.S., 1997. Developing countries breeding and potential of hybrid sorghum. In: Proceedings of the International Conference on Genetic Improvement of Sorghum and Pearl Millet, Lubbock, TX. 23–27 Sept. 1996. pp. 84-96.
- Hughes, K.A., Burlinson, M.H. and Rodd, F.H., 2002. Is phenotypic plasticity adaptive? In: Biodemography of Fertility. Edited by Rodgers, J.L. and Kohler, H.-C. Kluwer Academic Press, Dordrecht, the Netherlands, pp. 23-42.
- ICRISAT: Sorghum [Internet]. 2009. Patancheru (AP): International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics. [Cited 2009 Nov 20]. Available on the URL: <http://www.icrisat.org/sorghum/sorghum.htm>.
- IPCC, 2007. Climate change: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, 996 p.
- Jain, S.K., and Patel, P.R., 2008. Variability, correlation and path analysis studies in sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench). Forage Research Journal, 39(1):27-30.
- Jain, S.K., Patel, P.R., 2013. Variability, correlation and path analysis studies in sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench). Forage Res. 39(1) : 27-30.
- Jeuffroy, M.H., Bergez, J.E., David, C., Flénet, F., Gate, P., Loyce, C., Maupas, F., Meynard, J.M., Reau, R., Surleau-Chambenoit, C., 2008. Utilisation des modèles pour l'aide à la conception et à l'évaluation d'innovations techniques en production végétale : bilan et perspectives. In : Reau, R. and Doré, T. (Eds.), Systèmes de culture innovants et durables : Quelles méthodes pour les mettre au point et les évaluer ? Educagri, Dijon, pp 110-128.
- Jeuffroy, M.H., Casadebaig, P., Debaeke, P., Loyce, C., Meynard, J.M., 2014. Agronomic model uses to predict cultivar performance in various environments and cropping systems: a review. Agron Sustain Dev. 34: 121–137.
- Jones, J.W., Luyten, J.C., 1998. Simulation of biological processes. In: Peart, R.M. and Bruce Curry, R. (Eds.), Agricultural systems modeling and simulation. Marcel Dekker, New York, pp 19-62.
- Jordan, D.R., Tao, Y., Godwin, I.D., Henzell, R.G., Cooper, M., McIntyre, C.L., 2003. Prediction of hybrid performance in grain sorghum using RFLP markers. Theor. Appl. Genet. 106: 559–567.
- Kadrani, A., Sidi, M.M.O., Quilot-Turion, B., Génard, M., Lescourret, F., 2012. Particle swarm optimization to design ideotypes for sustainable fruit production systems. Int J Swarm Intelligence Res. 3: 1–19.
- Kadore-Zoungrana, C. Y., 1995. Composition chimique et valeur nutritive des herbacées et ligneux des pâturages naturels soudaniens et des sous-produits du Burkina Faso. Thèse de doct. D'Etat es. sc. nat., université de Ouagadougou, 224 p + annexes.
- Kang, M.S., 1993. Simultaneous selection for yield and stability in crop performance trials: consequences for growers. Agron. J. 85: 754-757.
- Kayodé, A.P.P., Deh, D.C., Baba-moussa, L., Kotchoni, S.O., Hounhouigan, J.D., 2012. Stabilization and preservation of probiotic properties of the traditional starter of African opaque sorghum beers. African J. Biotechnol. 11: 7725–7730. doi:10.5897/AJB11.3231.

- Kempton, R.A., 1984. The use of biplots in interpreting variety by environment interactions. *Journal of Agricultural Science*. 103: 123–135.
- Khandelwal, V., Shukla, M., Jodha, B.S., Nathawat, V.S. and Dashora, S.K., 2015. Genetic parameters and character association in sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench), *Indian Journal Science and Technology*. 8(22):1-5.
- Khandelwal, V., Keerthika, A., 2016. Genetic evaluation for agronomical traits in sorghum under arid condition. *Research Journal of Chemistry and Environment*, 20 (7): 1-5.
- Khanna-Chopra, R., 1982. Photosynthesis, photosynthetic enzymes and leaf area development in relation to hybrid vigour in *Sorghum vulgare* L. *Photosynth. Res.* 3: 113–122.
- 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.
- Kim, H.K., van Oosterom, E., Dingkuhn M., Luquet D., Hammer G., 2010a. Regulation of tillering in sorghum: environmental effects. *Annals of Botany*. 106: 57-67.
- Kishore, N., and Singh, L.N., 2005. Variability and association studies under irrigated and rainfed situations in the sub-montane region in forage sorghum. *Crop Research*. 29 (2):252-258.
- Kisua, J., Mwikamba, K., Makobe, M. and Muigari, A., 2015. Genetic diversity of sweet and grain sorghum populations using phenotypic markers, *International Journal of Biosciences*. 6(9): 34-46.
- Kouressy, M., S. B., Traore, M., Vaksman, M. Grum, I., Maikano, M., Soumare, P. S., Traore, D., Bazile, Dingkuhn, M., Sidibe, A., 2008. « Adaptation des sorghos du Mali a la variabilité climatique ». *Cahiers Agricultures*. 17 (2) : 95-100.
- Kumar, N.V., Reddy, C.V.C.M., Reddy, P.V.R.M., 2012. Study on Character Association in Rabi Sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench). *Plant Arch.* 12(2): 1049–1051.
- Kumar, U., Laza, Ma R., Soulie, J.-C., Pasco, R., Mendez, V.S., Dingkuhn, M., 2016. Compensatory phenotypic plasticity of irrigated rice: sequential path analysis of yield components and simulation with the SAMARA crop model. *Field Crops Res.* 193: 164-177.
- Lancashire, P. D., H. Bleiholder, P. Langelüddecke, R. Stauss, T. Van Den Boom, E. Weber und A. Witzzenberger, 1991: An uniform decimal code for growth stages of crops and weeds. *Ann. appl. Biol.* 119: 561-601.
- Le Roy, X., Kane, M., Sy, M., Ball, O., Diallo, O., Ba, A., 2005. Le sorgho de décrue dans la vallée du Sénégal. Dakar : IRD, 7 p.
- Luce, C., 1985. Quelques données du programme sorgho au Sénégal. Atelier régional ouest Africain du sorgho (ICRISAT Mali, 21-25 Octobre 1985). ISRA / CNRA Bambey. 13p.
- Luce, C., 1988. L'amélioration du sorgho au Sénégal : acquis (1950-1986) et perspectives de recherches. 1 (2): 24.
- Luquet, D., Dingkuhn, M., Kim, H., Tambour, L., Clement-Vidal, A., 2006. EcoMeristem, a model of morphogenesis and competition among sinks in rice. 1. Concept: evaluation and sensitivity analysis. *Funct. Plant Biol.* 33: 309–323.

- Luquet, D., Soulié, J.C., Rebolledo, M.C., Rouan, L., Clément-Vidal, A., Dingkuhn, M., 2012. Developmental dynamics and early growth vigour in rice 2. Modelling genetic diversity using ecomeristem. *J. Agron. Crop Sci.* 198 : 385–398.
- Luquet, D., Rebolledo, M.C., Rouan, L., Soulie, J.-C., Dingkuhn, M., 2016. Heuristic exploration of theoretical margins for improving adaptation of rice through crop-model assisted phenotyping. In: Yin, Xinyou, Struik, Paul (Eds.), *Crop Systems Biology. Narrowing the Gaps between Crop Modelling and Genetics*. Springer International Publishing, Switzerland, pp. 105–127.
- Lyumugabe, F., Gros, J., Nzungize, J., Bajyana, E., Thonart, P., 2012. Characteristics of African traditional beers brewed with sorghum malt: a review. *Biotechnol. Agron. Soc. Env.* 16: 509–530.
- Mace, E.S., Tai, S., Gilding, E.K., Li, Y., Prentis, P.J., Bian, L., Campbell, B.C., Hu, W., Innes, D.J., Han, X., Cruickshank, A., Dai, C., Frère, C., Zhang, H., Hunt, C.H., Wang, X., Shatte, T., Wang, M., Su, Z., Li, J., Lin, X., Godwin, I.D., Jordan, D.R., Wang, J., 2013. Whole genome sequencing reveals untapped genetic potential in Africa's indigenous cereal crop sorghum. *Nat. Commun.* 4: 1 – 9.
- Maertens, C., Blanchet, R., et Puelch, J., 1974.- Influence de différents régimes hydriques sur l'absorption de L'eau et Ides éléments minéraux par la culture. 1) régimes hydriques, systèmes racinaires et modalités d'alimentation en eau. *Ann. agron.* 2(5) : 575-586.
- Mahmoud, M.A., Khidir, M.O., Khalifa, M.A., ElAhmadi, A.B., Musnad, H.A., Mohamed, E.I., 1996. Sudan country report to the FAO International Technical Conference on Plant Genetic Resources. Leipzig. pp.39-40.
- Makumburage, G.B., Stapleton, A., 2011. Phenotype uniformity in combined-Stress environments has a different genetic architecture than in single-Stress treatments. *Front. Plant Sci.* 2.
- Mallinath, V., Biradar, B.D., Chittapur, B.M., Salimath, P.M., Nirmala, Y. and Patil, S.S., 2004. Variability and correlation studies in pop sorghum Karnataka *Journal Agriculture Science*, (3): 463-467.
- Martre, P., Quilot-Turion, B., Luquet, D., Ould-Sidi, M., Chenu, K., Debaeke, P., 2015. Model assisted phenotyping and ideotype design. In: Calderini D, Sadras VO, eds. *Crop physiology applications for genetic improvement and agronomy*. 2nd Ed. Academic Press, pp. 349-373.
- Mathieu, B., 2005. Une démarche agronomique pour accompagner le changement technique : cas de l'emploi du traitement herbicide dans les systèmes de culture à sorgho repiqué au Nord-Cameroun. Thèse de doctorat : agronomie, Institut National Agronomique Paris-Grignon. 221 p.
- Mauboussin, J.C, Gueye, I., N'diaye, M., 1977. L'amélioration du sorgho au Sénégal. *Agronomie tropicale.* 32 (3): 303-308.
- Mayer, D.G., Butler, D.G., 1993. Statistical validation. *Ecol. Model.* 68: 21-32.
- Medraoui, L., Mohammed, A., Ouafae, B., Driss, M., Abdelkarim, F.M., 2007. Evaluation of genetic variability of sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) in northwestern Morocco by ISSR and RAPD markers. *Comptes Rendus Biologies.* (330) : 789-797.
- Mekbib, F., 2007. Infra-specific folk taxonomy in sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) in Ethiopia: folk nomenclature, classification, and criteria. *J. Ethnobiol. Ethnomed.* 3, 38. doi :10.1186/1746-4269-3-38.

- Menad, A., Meziani, N., Bouzerzour, H. and Benmahammad, A., 2010. Analyse de l'interaction géotype x milieux du rendement de l'orge (*Hordeum vulgare* L.) : application des modèles AMMI et la régression conjointe. *Nature & Technologie*. 05: 99-106.
- Muchow, R.C., Sinclair, T.R., 1994. Nitrogen response of leaf photosynthesis and canopy radiation use efficiency in field-grown maize and sorghum. *Crop Sci*. 34: 721-727.
- Ndiaye, A., Fofana, A., Ndiaye, M., Mbaye, D.F., Sène, M., Mbaye, I., Chantereau, J., 2005. Les céréales. In : ISRA, ITA, CIRAD eds. Bilan de la recherche agricole et agroalimentaire au Sénégal. Dakar: ISRA, pp. 241-256.
- Ndiaye, M., Adam M., Muller B., Guisse A., Cissé N., 2018. Performances agronomiques et stabilité phénotypique de géotypes de Sorgho (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) au Sénégal : une étude des interactions géotypes-environnement. *Journal of Applied Biosciences*, 125 : 12617-12629.
- Nassar, R. and Huhn, M., 1987. Studies on estimation of phenotypic stability: Tests of significance for nonparametric measures of phenotypic stability. *Biometrics*. 43: 45-53.
- Nnamchi, C.I., Okolo, B.N., Moneke, A.N., 2014. Grain and malt quality properties of some improved Nigerian sorghum varieties. *J. Inst. Brew*. 120: 353-359. doi:10.1002/jib.164.
- Nouza, A., 1984. L'intoxication cyanhydrique. Contribution à l'étude de son diagnostic expérimental chez les ovins. Thèse de doctorat vétérinaire, Faculté de médecine, Nantes, 104 p.
- Nyadanu, D., Dikera E., 2014. Exploring variation: relationships and heritability of traits among selected accessions of sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) in the Upper East Region of Ghana. *J. Plant Breed. Genetics*. 2: 101-107.
- Okiyo, T., Gudu, S., Kiplagat, O., Owuoche, J., Campus, C., 2010. Combining drought and aluminium toxicity tolerance to improve sorghum productivity. *African Crop Sci. J*. 18: 147-154.
- Pale, S., Taonda, S.J.-B., Bougouma, B., Mason, S.C., 2010. Sorghum Malt and Traditional Beer (Dolo) Quality Assessment in Burkina Faso. *Ecol. Food Nutr*. 49: 129-141.
- Passioura, J. B., 1996. Simulation models: science, snake oil, education or engineering. *Agron. J*. 88:690-694.
- Peng, S., Cassman, K.G., Kropff, M.J., Peng, S.B., 1995. Relationship between leaf photosynthesis and nitrogen content of field-grown rice in tropics. *Crop Sci*. 35: 1627-1630.
- Piedallu, A., 1923. Le sorgho : son histoire, ses applications. Société d'éditions géographiques, maritimes et coloniales, Paris, cité par ADRIAN et JACQUOT, 1964
- Polania, J., Poschenrieder, C., Rao, I., Beebe, S., 2017. Root traits and their potential links to plant ideotypes to improve drought resistance in common bean. *Theoretical Exp Plant Physiol*. 29(3): 143-154.
- Prakasham, R.S., Nagaiah, D., Vinutha, K.S., Uma, A., Chiranjeevi, T., Umakanth, A. V, Rao, P.S., Yan, N., 2014. Sorghum biomass: a novel renewable carbon source for industrial bioproducts. *Biofuels* 5: 159-174.
- Price, H.J., Dillon, S.L., G, H., L, R.W., Ross, L., Johnston, J.S., 2005. Genome Evolution in the Genus Sorghum (Poaceae). *Ann. Bot*. 95, 219-227. doi:10.1093/aob/mci015.

- Qi., R., Ma, Y., Hu, B., de Reffye, P., Cournede, P.H., 2010. Optimization of source-sink dynamics in plant growth for ideotype breeding: a case study on maize. *Comput Electron Agr.* 71: 96–105.
- Quilot-Turion, B., Ould-Sidi, M.M., Kadrani, A., Hilgert, N., Genard, M., Lescourret, F., 2012. Optimization of parameters of the 'Virtual Fruit' model to design peach genotype for sustainable production systems. *Eur J Agron.* 42: 34–48.
- 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.
- Raju, B.M.K., 2002. Study of AMMI model and its biplots. *Journal of the Indian Society of Agricultural Statistics.* 55(3): 297-322.
- Rashida, A.M., Mohammed, M.I., 2012. Evaluation of new locally developed sorghum Hybrids. *J.Sci.Technol.* 1: 66-77.
- Rasmusson, D.C., 1991. A plant breeder's experience with ideotype breeding. *Field Crops Res.* 26: 191-200.
- Raton, F.L., Gauch, H.G., 1992. Statistical analysis of regional yield trials. *AMMI Analysis of Factorial Designs.* Elsevier, New York.
- Rattunde, H.F.W., Zerbini, E., Chandra, S., Flower, D.J., 2001. Stover quality of dual-purpose sorghums: genetic and environmental sources of variation, *Field Crops Research*, Volume 71, Issue 1, Pages 1-8.
- Rattunde, H.F.W., Weltzien, E., Diallo, B., Diallo, A.G., Sidibe, M., Touré, A.O., Rathore, A., Das, R.R., Leiser, W.L., Touré, A., 2013. Yield of photoperiod-sensitive sorghum hybrids based on guinea-race germplasm under farmers' field conditions in Mali. *Crop Science* 53: 1-8.
- Reddi, S.G., Janawade, A.D., Palled, Y.B., 2013. Influence of sowing dates on growth, grain and ethanol yield and economics. *Int. J. Agric. Sci. Vet. Med.* 1: 12–17.
- Reddy, V.S.B., Ramesh, S., Reddy, P.S., Ramaiah, B., Salimath, P.M., Kachapur, R., 2005. Sweet sorghum-A potential alternate raw material for bio-ethanol and bioenergy. *Int. Sorghum Millets Newslett.*46: 79-86.
- Reddy, B.V.S., Kumar, A.A., Reddy, P.S., Elangovan, M., 2008. Sorghum germplasm: diversity and utilization. In: *Sorghum genetic enhancement: research process, dissemination and impacts.* International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics, Patancheru, Andhra Pradesh, India pp: 153-169.
- Reddy, R.Y., Ravi, D., Reddy, R.C., Prasad, K.V.S.V., Zaidi, P.H., Vinayan, M.T., Blümmel, M. A., 2013. A note on the correlations between maize grain and maize stover quantitative and qualitative traits and the implications for whole maize plant optimization. *Field Crops Research.* 153: 63-69.
- Reynolds, M. D., Bonnett, S. C., Chapman, R. T., Furbank, Y., Manes, and D. E., Mather, et al., 2011. Raising yield potential of wheat. I. Overview of a consortium approach and breeding strategies. *J. Exp. Bot.* 62: 439–452.
- Rickard, C.G., 1976. Les plantes cyanogénétiques et les intoxications qu'elles provoquent. Thèse de doctorat vétérinaire, Université Paul Sabatier, Toulouse, 123 p.

- 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.
- Ross, W.M., Groz, H.J., Haskins, F.A., Hookstra, G.H., Rutto, J.K., Ritter, R., 1983. Combining ability effects for forage residue traits in grain Sorghum hybrids. *Crop Sci.* 23: 97-101.
- Rotter, R. P., Carter, T. R., Olesen, J. E., Porter, J.R., 2011a. Crop-climate models need an overhaul. *Nat. Clim. Change* 1: 175–177.
- Rötter, R.P., Carter, T.R., Olesen, J.E., Porter, J.R., 2011b. Crop-climate models need an overhaul. *Nat. Clim. Change* 1: 175–177.
- Rotter, R., Tao, F., Hohn, J., Palosuo, T., 2015. Use of crop simulation modelling to aid ideotype design of future cereal cultivars. *J Exp Botany.* 66(12): 3463–3476.
- Sadras, V.O., Reynolds, M.P., de la Vega, A.J., Petrie, P.R., Robinson, R., 2009. Phenotypic plasticity of yield and phenology in wheat: sunflower and grapevine. *Field Crops Res.* 110: 242–250.
- Salack, S., Muller, B., Gaye, A.T., 2011. Rain-based factors of high agricultural impacts over Senegal. Part I: integration of local to sub-regional trends and variability. *Theoretical and Applied Climatology.* 2011: 106:1-22.
- Sambakhé, D., 2018. Recherche de carte d'idéotypes de sorgho d'après un modèle de culture : optimisation conditionnelle à l'aide d'un métamodèle de krigeage. Thèse de Doctorat d'Université, Montpellier, 128 p.
- Sanon, M., Hoogenboom, G., Traoré, S.B., Sarr, B., Garcia, A.G. y, Somé, L., Roncoli, C., 2014. Photoperiod sensitivity of local millet and sorghum varieties in West Africa. *NJAS -Wageningen J. Life Sci.* 68: 29–39.
- Scapim, C.A., Pacheco, C.A.P., Amaral Júnior, A.T., Vieira, R.A., et al., 2010. Correlations between the stability and adaptability statistics of popcorn cultivars. *Euphytica.* 174: 209-218.
- Scheiner, S. M., 1993. Genetics and evolution of phenotypic plasticity. *Annu. Rev. Ecol. Syst.* 24: 35–68.
- Schlichting, C.D., 1986. The evolution of phenotypic plasticity in plants. *Annu. Rev. Ecol. Syst.* 17: 667–693.
- Schlichting, C.D., 2002. Phenotypic plasticity in plants. *Plant Species Biol.* 17: 85–88.
- Schlichting, C.D., 2002. Phenotypic plasticity in plants. *Plant Species Biology* 17, 85-88.
- Sultan, S.E., 1987. Evolutionary implications of phenotypic plasticity in plants. *Evolutionary Biology.* 21: 127-178.
- Schnitzenbaumer, B., Kaspar, J., Titze, J., Arendt, E., 2014. Implementation of commercial oat and sorghum flours in brewing. *Eur. Food Res. Technol.* 238 : 515–525.
- Seguin, B., Soussana, J.F., 2008. Emissions 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'INR.* 55: 79-91.
- Seleem, H.A., Omran, A.A., 2014. Evaluation Quality of One Layer Flat Bread Supplemented with Beans and Sorghum Baked on Hot Metal Surface 2246–2256.
- Semchenko, M., Zobel, K., 2005. The effect of breeding on allometry and phenotypic plasticity in four varieties of oat (*Avena sativa* L.). *Field Crops Res.* 93: 151–168.

- Semenov, M. A., Halford, N.G., 2009. Identifying target traits and molecular mechanisms for wheat breeding under a changing climate. *J. Exp. Bot.* 60: 2791–2804.
- Semenov, M. A., Shewry, P.R., 2011. Modelling predicts that heat stress, not drought, will increase vulnerability of wheat in Europe. *Sci. Rep.* 1:66.
- Semenov, M.A., Stratonovitch, P., 2013. Designing high-yielding wheat ideotypes for a changing climate. *FoodEnergy Security*, 2: 185–196.
- Silva Filho, J.L., Morello, C.L., Farias, F.J.C. and Lamas, F.M., 2008. Comparação de métodos para avaliar a adaptabilidade e estabilidade produtiva em algodoeiro. *Pesq. Agropec. Bras.* 43: 349-355.
- Sinclair, T. R., Seligman, N.G., 1996. Crop modelling: from infancy to maturity. *Agron. J.* 88: 698–704.
- Sine B. 2009. Evaluation agro-morphologique d'une *core* collection de sorgho (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) et caractérisation racinaire de variétés contrastées pour la détermination de critères racinaires d'adaptation à la sécheresse. Thèse de Doctorat, Université Cheikh Anta DIOP de Dakar, Sénégal, 155p.
- Sivakumar, M.V.K., 1988. « Predicting rainy season potential from the onset of rains in southern sahelian and soudanian climatic zones of West Africa ». *Agricultural and Forest Meteorology.* 42(4): 295-305.
- Sultan, S. E., 2000. Phenotypic plasticity for plant development, function and life history. *Trends Plant Sci.* 5: 537–542.
- Sultan, S.E., 2005. An emerging focus on plant ecological development. *New Phytologist.* 166 : 1-5.
- Sultan, B., Janicot, S., Baron, C., Dingkuhn, M., Muller, B., Traoré, S., Sarr, B., 2008. Les impacts agronomiques du climat en Afrique de l'Ouest : une illustration des problèmes majeurs. *Sécheresse.* 19: 29–37.
- Sultan, B., Roudier, Ph., Quirion, P., Alhassane, A., Muller, B., Dingkuhn, M., Ciais, Ph., Guimberteau, M., Traore, S. and Baron, Ch., 2013. Assessing climate change impacts on sorghum and millet yields in the Sudanian and Sahelian savannas of West Africa. *Environ. Res. Lett.* 8 (2013) 014040 (9pp).
- Suriharn, B., Patanothai, A., Boote, K.J., Hoogenboom, G., 2011. Designing a peanut ideotype for a target environment using the CSM-CROPGRO-Peanut Model. *Crop Sci.* 51: 1887–1902.
- Tardieu, F., 2003. Virtual plants: modelling as a tool for genomics of tolerance to water deficit. *Trends Plant Sci.* 8: 9–14.
- Tardieu, F., Tuberosa, R., 2010. Dissection and modelling of abiotic stress tolerance in plants. *Curr. Opin. Plant Biol.* 13: 206–212.
- Timsina, J., Godwin, D., Humphreys, E., Singh, Y., Singh, B., Kukal, S. S., Smith, D., 2008. Evaluation of options for increasing yield and water productivity of wheat in Punjab, India, using the DSSAT-CSM-CERES-wheat model. *Agricultural Water Management.* 95: 1099–1110.
- Tittonell, P., Giller, K. E., 2013. When yield gaps are poverty traps: The paradigm of ecological intensification in African smallholder agriculture, *Field Crops Research.* 143: 76-90.

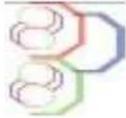
- Traoré, S.B., Reyniers F., Vaksman, M., Koné, B., Sidibé, A., Yoroté, A., Yattara, K., Kouressy, M., 2000. Adaptation à la sécheresse des écotypes locaux de sorghos du Mali, *Sécheresse*. 11: 227–237.
- Traore, P.S.C., Kouressy, M., Vaksman, M., Tabo, R., Maikano, I., Traore, S.B., Cooper, P., 2007. Climate prediction and agriculture: what is different about sudano-Sahelian West Africa? In: Sivakumar, M.V.K., Hansen, J. (Eds.), *Climate Prediction and Agriculture: Advances and Challenges*. Pub. Springer-Verlag, Berlin, pp. 189–203.
- Triboi, E., Triboi-Blondel, A.M., 2002. Productivity and grain or seed composition: a new approach to an old problem. *Eur. J. Agron.* 16 : 163–186.
- Trouche, G., 1992. Amélioration variétale du sorgho région du fleuve Sénégal. Rapport analytique contre-saison 1991-92. ISRA/CNRA, Bambey. 23p.
- Trouche, G., 1993. Synthèse de trois années de recherches sur l'amélioration variétale du sorgho. Projet SAR II, ISRA, MSU, USAID, ISRA, 11 p.
- Trouche, G., Acuña, S.A., Hocdé, H., Solís, R.O., Wong, Z.C., 2008. Valorisation de la diversité génétique du sorgho par des approches de sélection participative au Nicaragua, *Cahiers Agricultures*. 17(2) : 154-159.
- 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 (1978) : 1-36.
- Valentine, J., Clifton-Brown, J., Hastings, A., Robson, P., Allison, G., Smith, P., 2012. Food vs. fuel: the use of land for lignocellulosic “next generation” energy crops that minimize competition with primary food production. *GCB Bioenergy*. 4 : 1–19.
- Valet, S., 1984. Bilan hydrique sous cultures dans les essais “ travail du sol ” en sols sableux (Nioro) et en sols sablo-argileux (Thysse). Année 1983. ISRA. BP 199, Kaolack, Sénégal. 16p. 1984b.
- Vanlauwe, B., Bationo, A., Chianu, J., Giller, K.E., Merckx, R., Mkwunye, U., Ohiokpehai, O., Pypers, P., Tabo, R., Shepherd, K.D., Smaling, E.M.A., Woomer, P.L., Sanginga, N., 2010. Integrated soil fertility management: Operational definition and consequences for implementation and dissemination. *Outlook Agric.* 39, 17–24.
- Velázquez, N., Sánchez, H., Osella, C., Santiago, L.G., 2012. Using white sorghum flour for gluten-free breadmaking. *Int. J. Food Sci. Nutr.* 63: 491–7.
- Via, S., 1992. Models of the Evolution of Phenotypic Plasticity. *Trends in Ecology & Evolution* 7, 63.
- Voigt, J., Botha, P.R., Gerber, H.S., 2008. The effect of planting date on the dry matter production of annual forage sorghum hybrids and hybrid millet cultivars. *Grassroots Newsl. Grassl. Soc. South. Africa*. 8: 18–24.
- Vom Brocke, K., Trouche, G., Weltzien, E., Barro-Kondombo, C.P., Gozé, E., Chantereau, J., 2010. Participatory variety development for sorghum in Burkina Faso: Farmers' selection and farmers' criteria. *Field Crops Research*. 119 (1): 183-194.
- Vos, J., Evers, J.B., Buck-Sorlin, G.H., Andrieu, B., Chelle, M., de Visser, P.H.B., 2010. Functional–structural plant modelling: a new versatile tool in crop science. *J. Exp. Bot.* 61: 2101–2115.
- Wada, Y., Wada, G., 1991. Varietal difference in leaf senescence during ripening period of advanced indica rice. *Jpn. J. Crop Sci.* 60: 529–536.

- Wallach, D., 2006a. The two forms of crop models. In: Wallach, D., Makowski, D., and Jones, J.W. (Eds.), working with dynamic crop models. Elsevier, Amsterdam, pp. 3-10.
- Wang, E., Robertson, M.J., Hammer, G.L., Carberry, P.S., Holzworth, D., Meinke, H., Chapman, S.C., Hargreaves, J.N.G., Huth, N.I., McLean, G., 2002. Development of a generic crop model template in the cropping system model APSIM. *European Journal of Agronomy*. 18 : 121-140.
- Watt, A., 1986. Le semis du sorgho de décrue au Fuuta. Initiation aux technologies populaires. Initiation N° 04, ENDA Tiers-monde, Dakar, 60p.
- Weltzien, E., Kanoute, M., Toure, A., Rattunde, F., Diallo, B., Sissoko, I., Sangare, A., Siart, S., 2008. Sélection participative des variétés de sorgho à l'aide d'essais multiloaux dans deux zones cibles. *Cahiers Agricultures*. 17 (2): 134-139.
- Westcott, B., 1987. A method of assessing the yield stability of crop genotypes. *J agric Sci Camb*. 108: 267-274.
- White, J. W., Hoogenboom, G., Kimball, B.A., Wall, G.W., 2011. Methodologies for simulating impacts of climate change on crop production. *Field Crops Res*. 124:357–368.
- Witzenberger, A., H. Hack und T. Van Den Boom, 1989: Erläuterungen zum BBCH Dezimal-Code für die Entwicklungsstadien des Getreides – mit Abbildungen. *Gesunde Pflanzen*. 41: 384-388.
- Wu, E., Lenderts, B., Glassman, K., Berezowska-Kaniewska, M., Christensen, H., Asmus, T., Zhen, S., Chu, U., Cho, M.J., Zhao, Z.Y., 2014. Optimized Agrobacterium-mediated sorghum transformation protocol and molecular data of transgenic sorghum plants. *Vitr. Cell. Dev. Biol. Plant*. 50: 9–18.
- Yacine, T.E., 1978. Phenotypic variations in local Sorghum in the Soudan Nuba Mountains. *Exp. Agric*. 14: 181-188.
- 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.
- Yan, H.-P., Kang, M.Z., De Reffye, P., Dingkuhn, M., 2004. A dynamic, architectural plant model simulating resource-dependent growth. *Ann. Bot*. 93: 591–602.
- Zali, H., Farshadfar, E., Sabaghpour, S.H., Karimizadeh, R., 2012. Evaluation of genotype × 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: 388-393.

Annexes

Annex1 : Article issu des travaux de la thèse et publié.

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



Journal of Applied Biosciences 125: 12617-12629

ISSN 1997-5902

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

Malick NDIAYE^{1,2*}, Myriam ADAM^{3,6,7}, Bertrand MULLER^{2,3,4}, Aliou GUISSSE⁵, Ndiaga CISSE²

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

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

³. UMR-AGAP, Univ Montpellier, CIRAD, INRA, Montpellier SupAgro, B.P. 34398 Montpellier, France

⁴. CIRAD, UMR AGAP, 101 Antananarivo, Madagascar

⁵. Université Cheikh Anta Diop de Dakar, Avenue Cheikh Anta Diop, BP 5005 Dakar, Sénégal

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

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

Auteur correspondant : (*) agromalick@yahoo.fr

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

RESUME

Objectif : L'introduction de nouveaux géotypes de sorghos adaptés à divers environnements est confrontée à la présence d'interaction géotype x environnements significative qui en réduit l'efficacité. La présente étude, conduite sur six environnements - combinaisons site-date de semis-année -, analyse l'interaction géotype-environnement et l'adaptabilité et stabilité du rendement grain et biomasse paille de 10 géotypes 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 géotypes, les environnements et leurs interactions. L'interaction significative a montré que les géotypes réagissent différemment dans les différents environnements. Les rendements moyens des géotypes ont varié de 1854 Kg.ha⁻¹ (Nieleni) à 547 Kg.ha⁻¹ (SK5912) pour le grain ; et de 12103 Kg.ha⁻¹ (IS15401) à 4647 Kg.ha⁻¹ (CSM63E) pour la biomasse paille. Pour les environnements, les rendements ont varié de 1714 Kg.ha⁻¹ (S13D1) à 530 Kg.ha⁻¹ (B13D2) pour le grain ; et de 9642 Kg.ha⁻¹ (B13D2) à 5742 Kg.ha⁻¹ (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 géotypes de sorghos que la stabilité des rendements est en général associée avec de faibles performances, à l'exception du géotype 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 géotypes et la plupart de ces géotypes 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 géotypes 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 géotype-environnement, stabilité, AMMI.

Annexe 2 : Rendement moyen (moyenne des répétitions) en grains (Kg.ha⁻¹) de chacun des dix géotypes sur chacun des onze environnements étudiés.

Géotype	Environnement											Moyenne Génotypique
	B13D1	B13D2	N15D1	N15D2	S13D1	S13D2	S14D1	S14D2	S15D1	S15D2	S16D1	
Fadda	1662	804	2417	1719	2329	1855	1604	2206	1634	2077	1857	1833
Nieleni	2011	972	1122	2824	2445	1742	2626	1326	2049	1871	2946	2018
IS15401	665	554	1431	1310	2182	1608	1297	1008	1524	1958	1883	1402
Pablo	1688	624	1432	1796	2111	1786	1592	1806	1435	1716	1780	1615
CSM63E	1423	346	1791	478	1628	1895	1939	1634	232	1247	2345	1360
SK5912	252	151	2050	1754	992	1071	459	358	477	503	-	807
Grinkan	888	502	1929	1707	1323	1475	1677	441	1171	881	1905	1281
Soumba	931	553	1381	2365	1016	1301	2307	900	1149	1339	2412	1443
621B	1367	491	1342	1503	1566	1665	1810	1064	533	572	3233	1392
F2-20	1223	409	1207	2205	1549	1302	1658	1110	1012	536	2453	1333
Moyen	1211	530	1610	1766	1714	1570	1697	1192	1122	1270	2313	1454

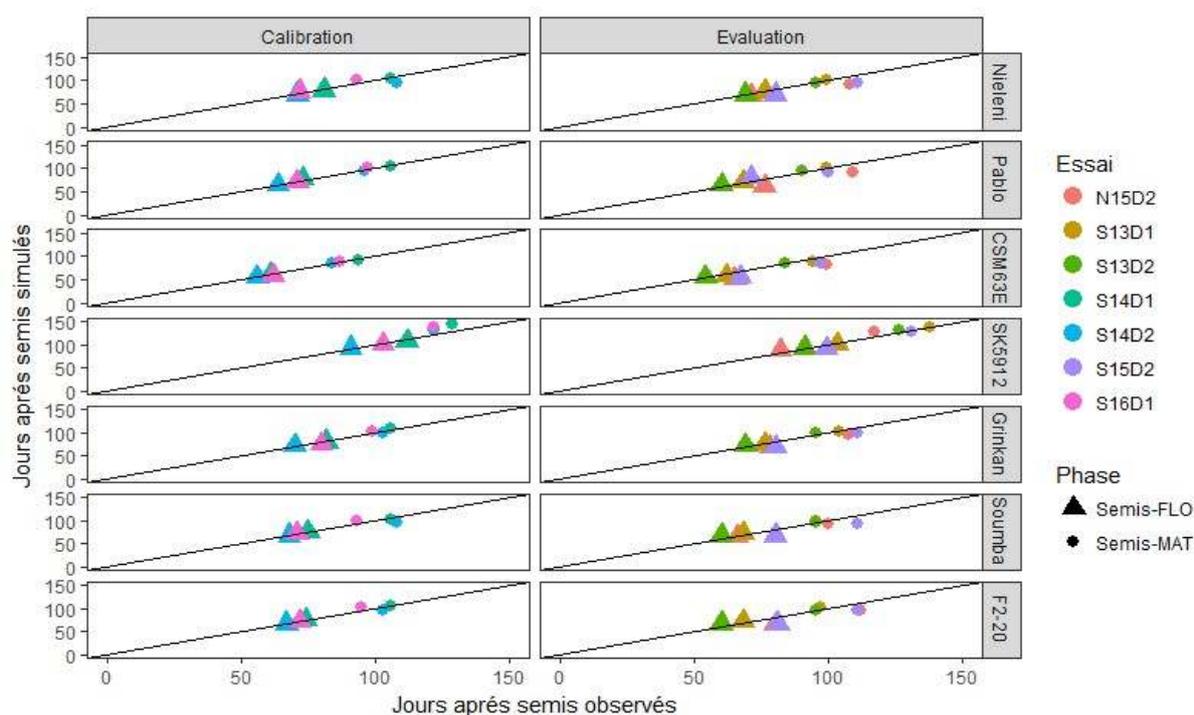
Annexe 3 : Rendement moyen (moyenne des répétitions) en biomasse paille (Kg.ha⁻¹) de chacun des dix géotypes sur chacun des onze environnements étudiés.

Géotype	Environnement											Moyenne Génotypique
	B13D1	B13D2	N15D1	N15D2	S13D1	S13D2	S14D1	S14D2	S15D1	S15D2	S16D1	
Fadda	11111	10546	10857	6496	7571	5409	10508	4966	6056	5447	8972	7995
Nieleni	7667	13322	3990	4004	5617	6473	8141	7277	5895	5360	8509	6784
IS15401	12315	15989	5655	10803	10611	7151	17077	8211	5841	6276	14073	10364
Pablo	8137	7198	4712	5855	7109	5775	8728	5982	6822	5431	7460	6655
CSM63E	3643	3051	5376	3134	4926	4529	7650	3842	4129	3591	6460	4576
SK5912	14806	13623	11591	8156	9827	7480	11870	8783	6867	7332	-	10115
Grinkan	9675	12020	9638	3489	6870	4812	8295	5297	4882	4682	7094	6860
Soumba	4756	7497	6669	4483	4034	5109	7196	5718	5991	3290	5820	5459
621B	3581	5955	4969	3003	4300	4889	4258	6829	3308	2888	5413	4379
F2-20	4863	7219	13140	4061	5261	5791	7568	7602	4833	4931	6870	6558
Moyen	8055	9536	7660	5348	6613	5742	9129	6431	5426	4923	7852	6954

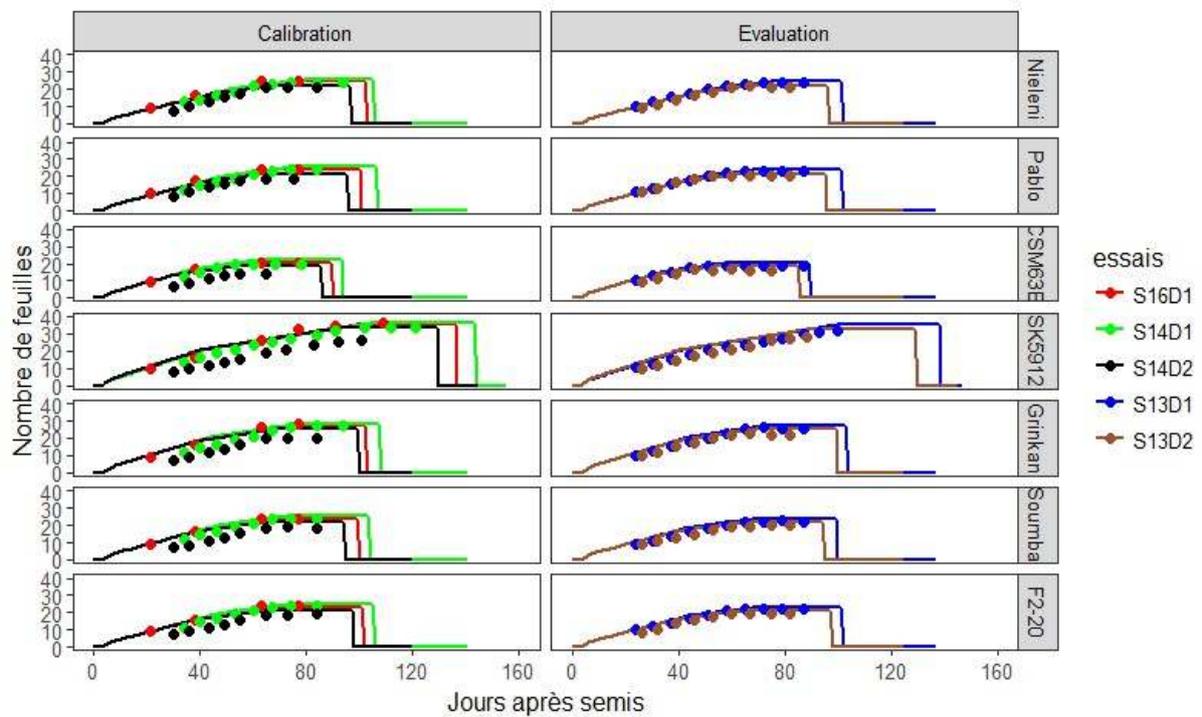
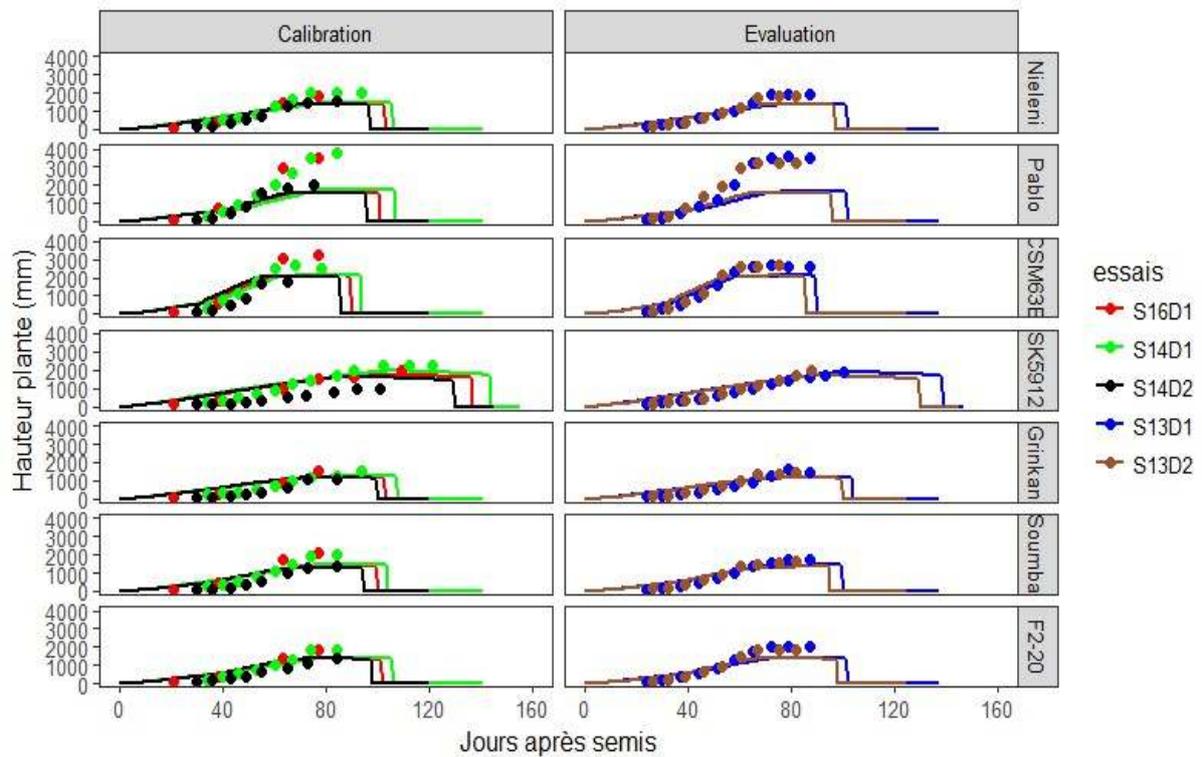
Annexe 4 : Paramètres génotypiques calculés en fonction des dix géotypes étudiés.

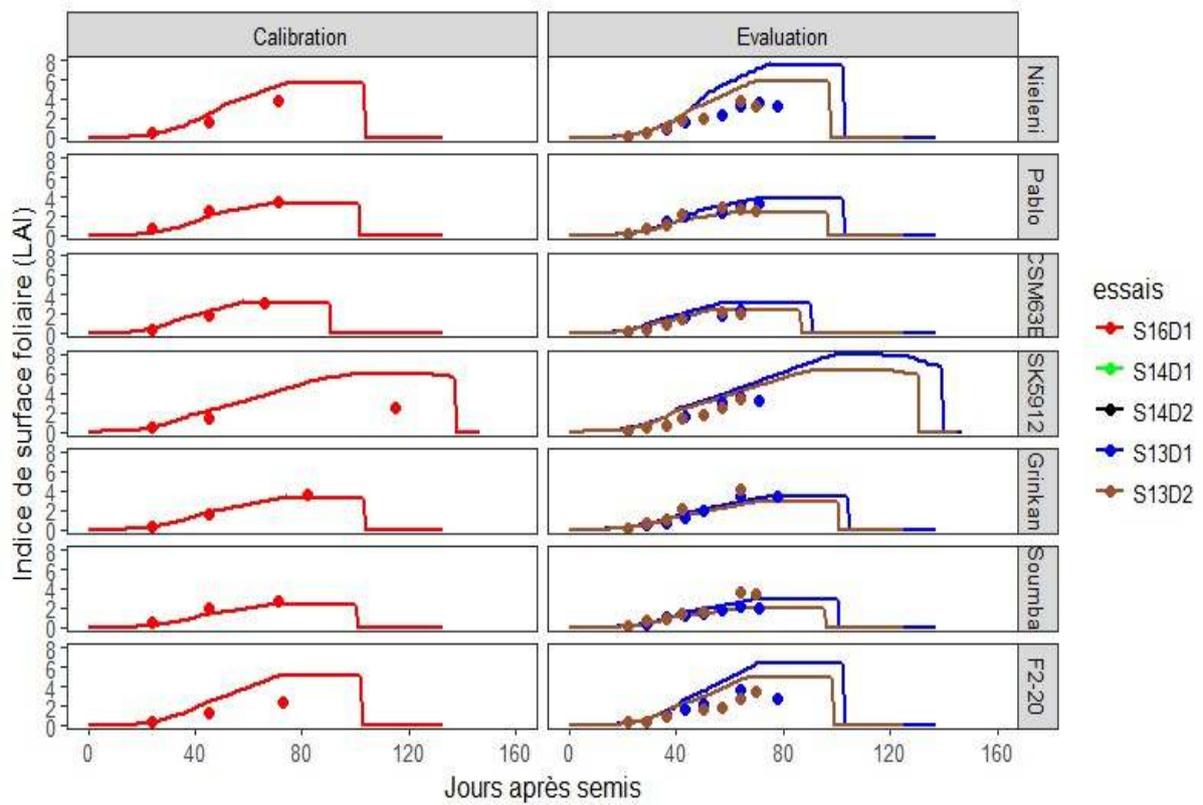
Géotype	Phyllo	SDJ BVP	SDJ MATU1	Internode LengthMax	Leaf LengthMax	CoeffLeaf WLRatio	Sla Min
FADDA	45	340,7	417,3	142	1012	0,10	0,00095
NIELENI	49	513,7	346,8	108	947	0,12	0,00168
IS15401	48	459,8	385,8	163	1204	0,09	0,00103
PABLO	44	303,4	446,7	163	1033	0,09	0,00147
CSM63E	51	321,5	422,7	162	909	0,09	0,00240
SK5912	52	591,9	417,5	83	1018	0,10	0,00086
GRINKAN	48	321,5	321,0	63	872	0,13	0,00141
SOUMBA	47	420,4	366,6	96	960	0,11	0,00091
621B	50	459,8	416,8	86	910	0,11	0,00135
F2-20	51	393,6	385,5	101	957	0,12	0,00164

Annexe 5 : Calibration et évaluation de la phénologie des géotypes étudiés.

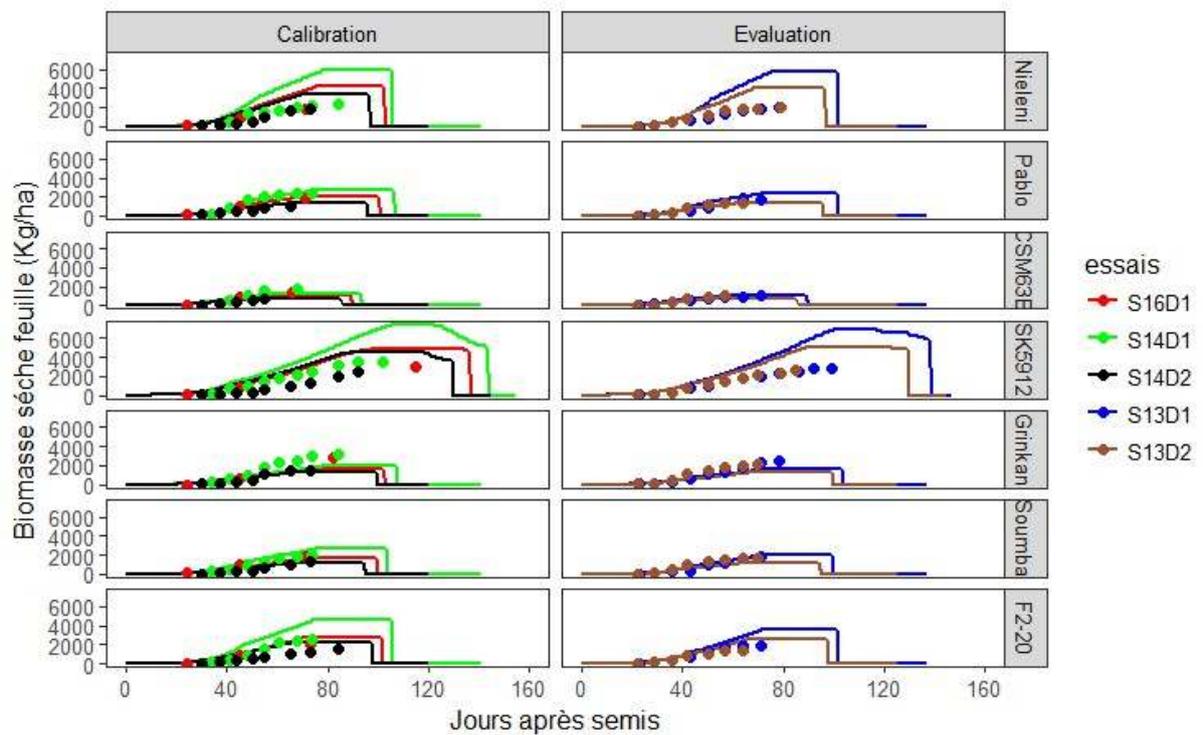


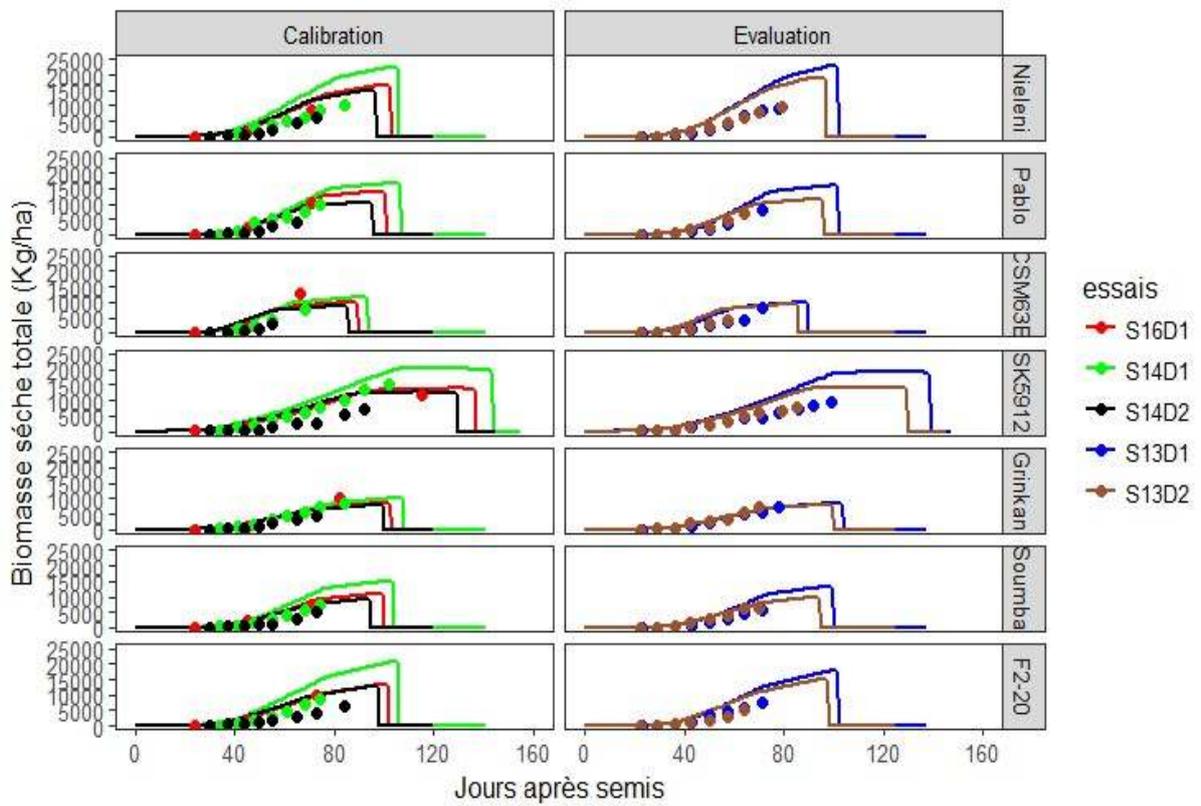
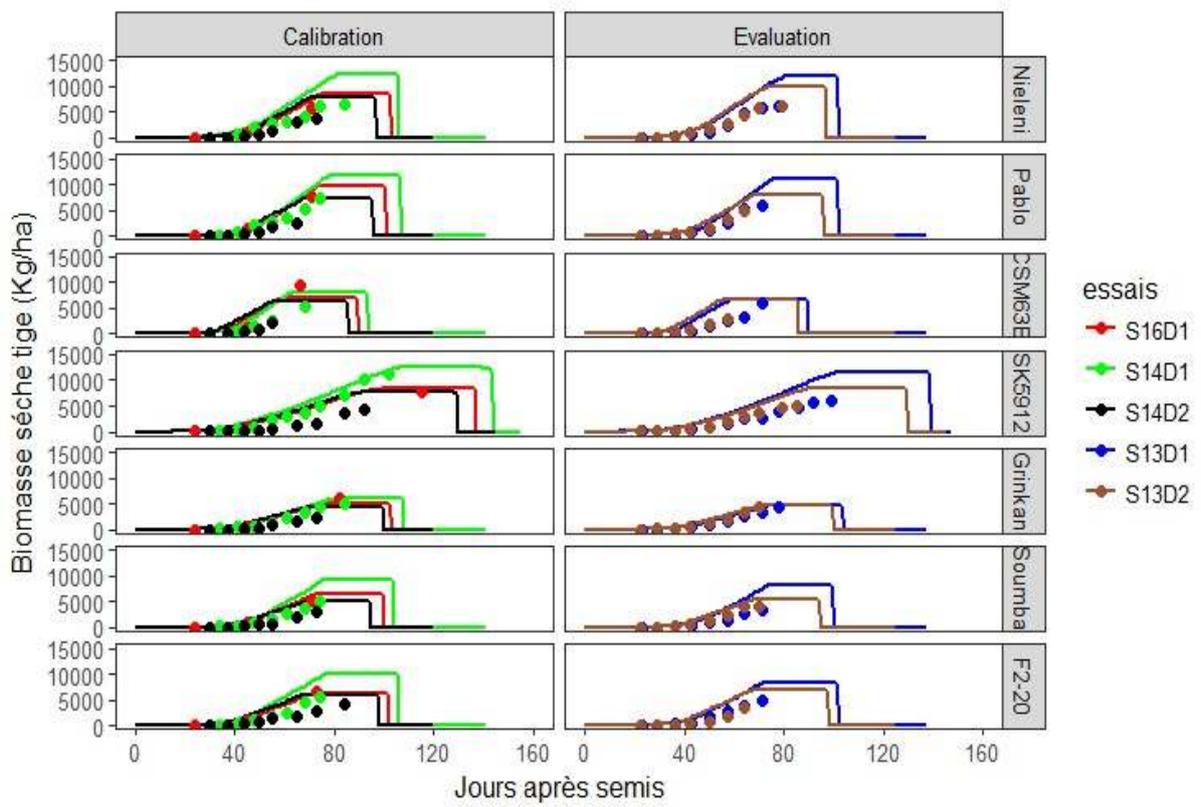
Annexe 6 : Calibration et évaluation de la morphologie des génotypes étudiés.



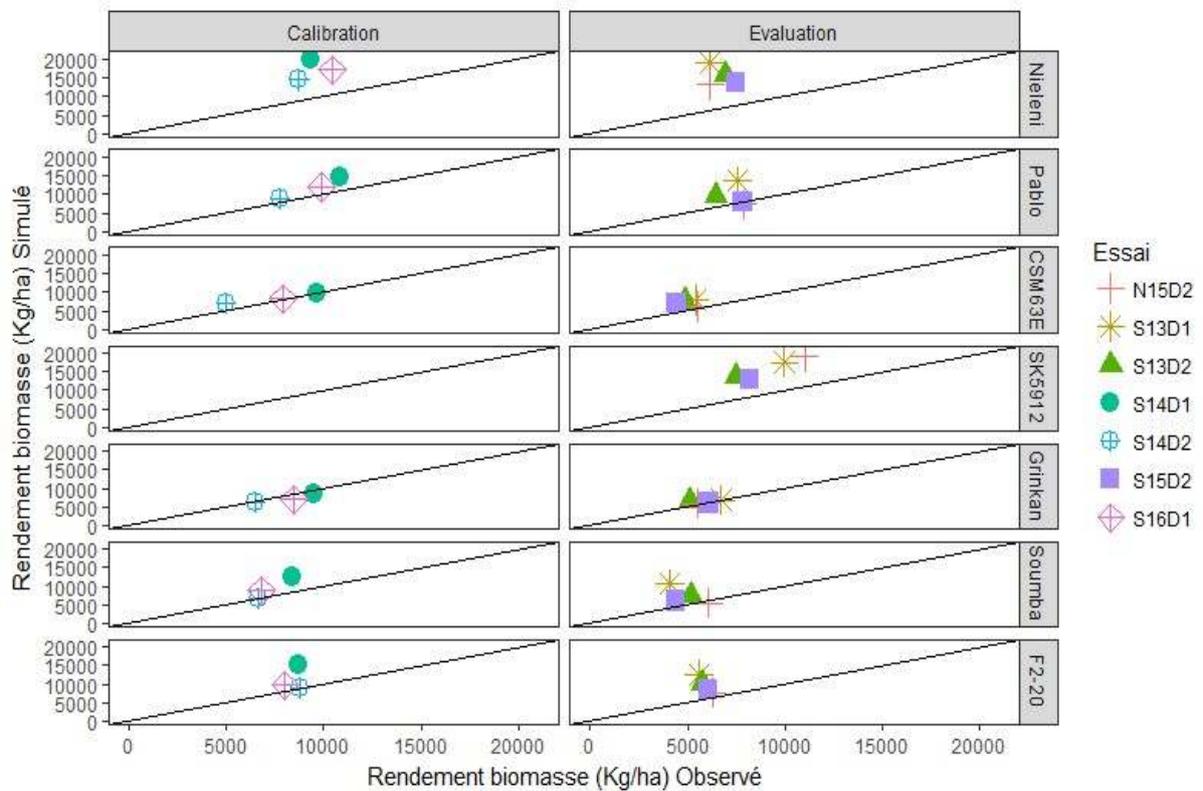
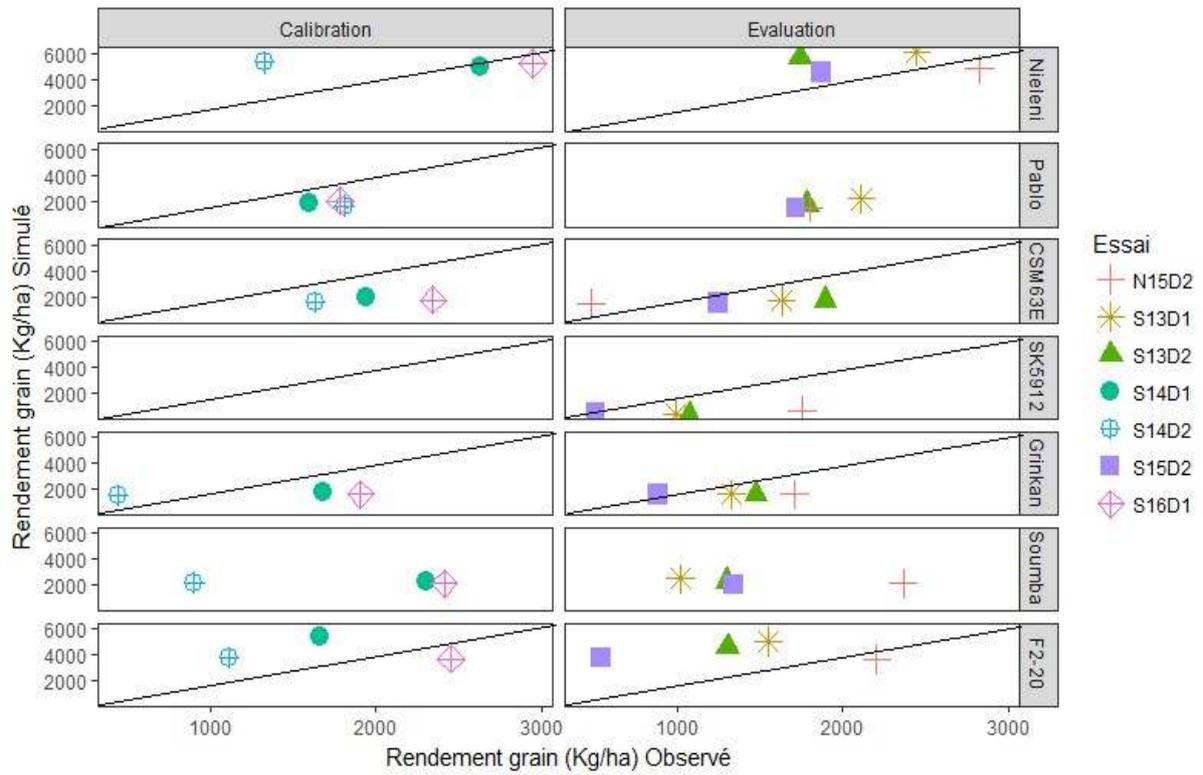


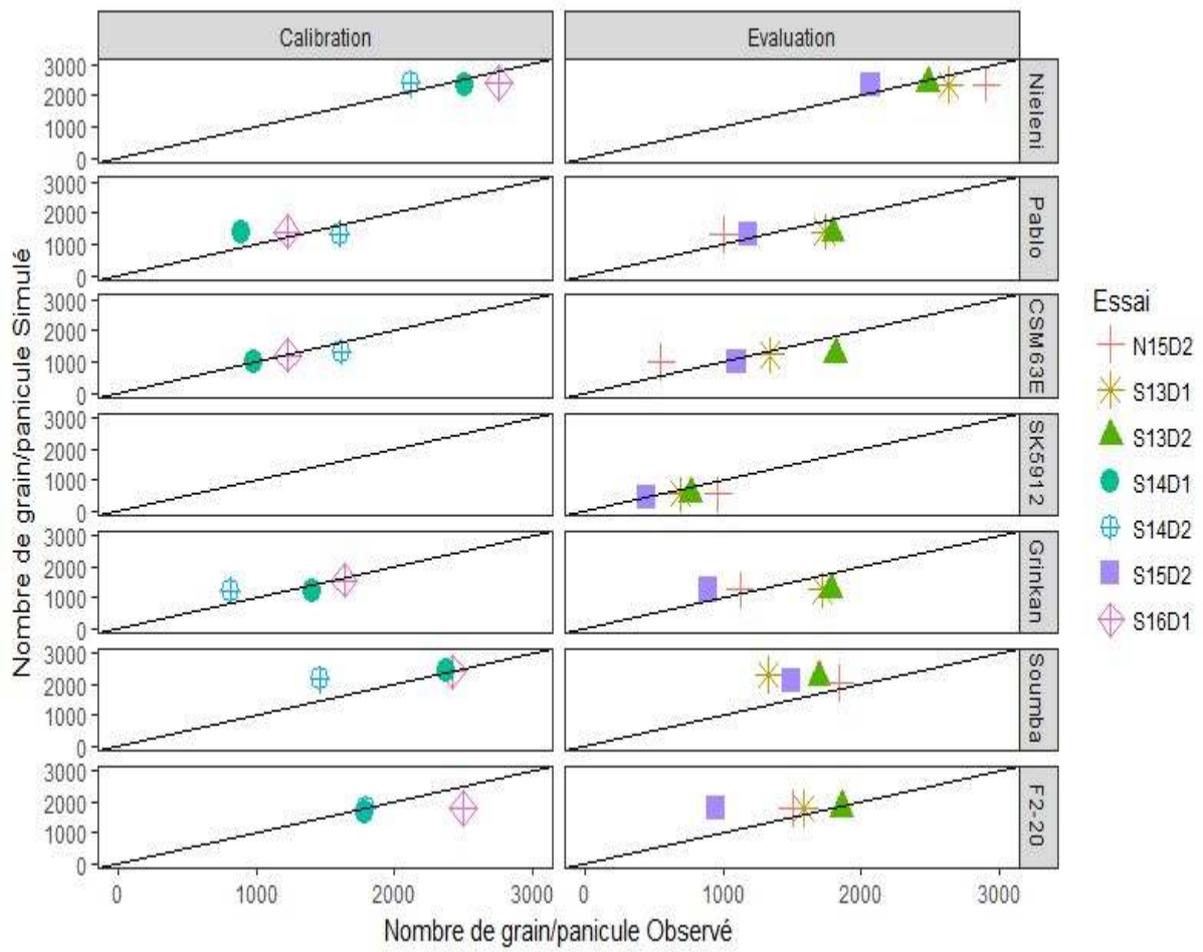
Annexe 7 : Calibration et évaluation des biomasses des génotypes étudiés.





Annexe 8 : Calibration et évaluation des rendements et composante des génotypes étudiés.





Auteur : Malick NDIAYE

Résumé

La thèse a pour objectif de contribuer à faciliter le choix de la création et/ou l'introduction de nouveaux génotypes de sorghos adaptés à divers environnements en termes de sol et de climat en développant une démarche aboutissant à la modélisation d'idéotypes variétaux de sorgho qui pourra alors être utilisés pour raisonner des choix variétaux en relation aux environnements et usages. Pour ce faire, 10 génotypes contrastés de sorgho de la sous-région réputés tous performants dans leur zone d'origine ont été mis en expérimentation dans trois environnements cibles (Bambey, Sinthiou Malem et Nioro du Rip) pour une caractérisation approfondie et la compréhension de leur fonctionnement et potentialités sous différentes conditions (potentiels, interactions « génotype-environnement », plasticité) en termes de production en quantité de grain et de biomasse. Ce volet a été complété par une étude de modélisation qui a abouti à la définition d'idéotypes. Les résultats ont montré que les génotypes étudiés ont réagi différemment dans les différents environnements. Les génotypes Nieleni et Fadda se sont distingués pour le double-usage dans la majorité des environnements et sont à recommander dans nos régions d'étude. Le génotype témoin sénégalais 621B a montré un très bon potentiel (car il peut produire plus de 3 t.ha⁻¹) dans de bonnes conditions agropédologiques (i.e. Sinthiou Malem). L'étude de la plasticité phénotypique et relation entre caractères d'intérêt et rendements a révélé que les caractères pour des sorghos double-usages comme la production de talles, le nombre de grains par panicule, le LAI et la longueur moyenne d'entrenœud ont été fortement plastiques et s'exprimaient mieux dans des environnements agropédologiques favorables (comme Sinthiou Malem). D'autres caractères tels que la durée du cycle, le poids de mille grains, le nombre et la taille des feuilles et la grosseur de la tige sont facilement utilisables par la sélection car relativement moins influencés par les environnements. En plus, un rendement élevé et stable en grains est apparu comme étant associé à une stabilité de la taille de feuille drapeau, de phénologie et de nombre de grains par panicule et celui en biomasse paille à une stabilité du diamètre de la tige. La calibration et l'évaluation du modèle de culture SAMARA a mis en évidence sa capacité à reproduire la plasticité phénotypique des génotypes étudiés malgré une sur-estimation des biomasses tige et totale et rendement en biomasse paille. Trois idéotypes (adapté à nos environnements cibles) ont été définis et ont montré des performances pour la double production supérieures à nos 10 génotypes étudiés ; ceci grâce à leur forte capacité à coloniser le sol (racines longues) et à maintenir une surface de feuilles verte (stay-green) ; caractères primordiaux pour avoir des idéotypes à double production dans nos environnements cibles surtout dans les zones les moins arrosées comme Bambey. Ces résultats pourront contribuer à l'amélioration du sorgho double-usage pour des environnements à faible pluviométrie.

Mots clés : Sorgho, interaction génotype x environnement, idéotype, SAMARA, double production, plasticité phénotypique

Abstract

The aim of the thesis is to contribute to facilitating the choice of the creation and / or the introduction of new sorghum genotypes adapted to various environments in terms of soil and climate by developing an approach leading to the modeling of varietal ideotypes of sorghum which can then be used to reason varietal choices in relation to the environments and uses. To do this, 10 contrasting sorghum genotypes from the subregion, all of which are successful in their area of origin, were tested in three target environments (Bambey, Sinthiou Malem and Nioro du Rip) for in-depth characterization and understanding of their functioning and potentialities under different conditions (potential, « genotype-environment » interactions, plasticity) in terms of grain and biomass production. This component was completed by a modeling study that resulted in the definition of ideotypes. The results showed the genotypes respond differently across the different environments. The Nieleni and Fadda genotypes have distinguished themselves for dual use in most environments and are recommended in our study areas. The Senegalese check genotype 621B showed a very good potential (because it can produce more than 3 t.ha⁻¹) in good agropedological conditions (i.e. Sinthiou Malem). The study of phenotypic plasticity and the relationship between traits of interest and yield revealed that characteristics for dual-use sorghums such as tiller production, number of grains per panicle, LAI, and mean internode length were highly plastic and expressed better in favorable agropedoclimatic environments (such as Sinthiou Malem). Other traits such as cycle time, thousand grain weight, number and size of leaves, and stem size are readily available for selection because they are relatively less influenced by environments. High, stable grain yield appeared to be associated with flag leaf size, phenology and number of grain per panicle stability and straw biomass stability at stem diameter stability. Calibration and evaluation of the SAMARA culture model demonstrated its ability to reproduce the phenotypic plasticity of the genotypes studied despite an over-estimation of stem and total biomass and yield of straw biomass. Three ideotypes (adapted to our target environments) were defined and showed performances for double production superior to our 10 studied genotypes; this thanks to their strong capacity to colonize the soil (long roots) and to maintain a green leaf surface (stay-green), characters that are essential for having double production ideotypes in our target environments, especially in the less watered areas like Bambey. These results may contribute to the improvement of dual-use sorghum for low rainfall environments.

Key-words : Sorghum, genotype x environment interaction, ideotype, SAMARA, double production, phenotypic plasticity

Spécialité : Production et Protection des Végétaux

CERAAS, Km 7,5 Route de Khombole. BP 3320 Thiès Escalé, Sénégal.