

UNIVERSITE ASSANE SECK DE ZIGUINCHOR



UFR Sciences et Technologies

Département d'Agroforesterie

Master en Aménagement et Gestion Durable des Écosystèmes Forestiers et Agroforestiers (AGDEFA)

**Évaluation agro-morphologique et physiologique d'une population « stay
green » de sorgho [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] pour la tolérance au
stress hydrique post-floral.**

Présenté par :

Fatou Binta FALL

Encadrants : Dr Aly DIALLO

Dr Cyril DIATTA

Soutenu le 11 Mai 2024 devant le jury composé de :

Président :	Pr Ismaïla COLY	Maître de Conférences	UFR-ST/ UASZ
Membres :	Dr Djibril SARR	Maître Assistant	UFR-ST/ UASZ
	Dr Abdoulaye SOUMARE	Assistant	UFR-ST/UASZ
	Dr Cyril DIATTA	Chargé de Recherche	CNRA/ISRA
	Dr Aly DIALLO	Maître Assistant	UFR-ST/UASZ

Dédicaces

Ce travail est dédié:

A mon père, Pape Aya FALL qui nous a toujours assisté et n'a ménagé aucun effort pour notre éducation.

A ma brave maman, Khady FALL pour les vertus qu'elle nous a inculquées et pour tous les sacrifices consentis.

A mon grand frère Babacar, il n'y a pas de mots pour vous exprimer toute notre reconnaissance

Remerciements

Nous rendons grâce à **Allah** le tout Puissant, le très Miséricordieux qui nous a donné la santé, le courage et la force de mener ce travail. Et nous prions sur son prophète **Mouhamad** (Paix et Salut sur lui).

Un accomplissement significatif ne peut être l'œuvre intégrale d'une personne isolée. Cette affirmation est surtout vérifiable dans la réalisation de ce mémoire qui a nécessité la mobilisation des ressources diverses et des synergies de toutes sortes.

Ce travail de recherche a été réalisé sous la direction de Dr Aly DIALLO Enseignant-chercheur à l'Université Assane Seck de Ziguinchor, Dr Cyril DIATTA chargé de recherches au CNRA/ISRA de Bambey, Monsieur Joseph Pascal SENE Etudiant thésard à WACCI/Université du Ghana en stage au CNRA/ISRA de Bambey. Nous ne pourrions manquer de les remercier pour leur encadrement de qualités et pour nous avoir accordé leur confiance et ce en dépit de leurs lourdes charges.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à toutes les personnes qui ont participées de près ou de loin à l'aboutissement de cette étude.

Nous remercions particulièrement tout le corps professoral du département d'Agroforesterie de l'Université Assane Seck de Ziguinchor pour nous avoir formé : Dr Djibril SARR chef du département d'Agroforesterie, Pr Ousmane NDIAYE, Pr Ngor NDOUR, Pr Ismaïla COLY, Pr Mouhamad Mahamoud CHARAHABIL, Dr Antoine SAMBOU, Pr Siré DIEDHIOU, Dr Boubacar CAMARA, Dr Joseph Saturnin DIEME, Dr Saboury NDIAYE, Dr Abdoulaye SOUMARE et Dr Oulimata DIATTA.

Mes sincères remerciements à toute l'équipe de la sélection sorgho : Souleymane BODIAN, Auguste Jean Grégoire COLY, Oumar BORO, Alassane DIOUF, Alamine BADIANE, Abdoulaye NDAW, Boubacar DIEDHIOU, Raphael Dimas SENGHOR, Mame Diarra SYLLA et particulièrement à Dieynaba Koné DIATTA une personne spéciale plein d'amour et d'affection.

Nous remercions également nos camarades de la 11^{ème} Promo du département d'Agroforesterie, plus particulièrement aux filles de Mariama BA.

Mention spéciale à Yaye Dié NIANG, Mame Diarra DIOP ma marraine de cœur, ma jumelle Arame NDIAYE, Awa FAYE, Fatoumata DIALLO, mon frère Thierno NDAO, Alassane SAMBOU, mes cousines de cœur Khady, Binta et Madjiguéne.

Mes remerciements vont à l'endroit de tous les membres de ma famille.

Table des matières

Dédicaces.....	i
Remerciements	ii
LISTE DES TABLEAUX	vi
LISTE DES FIGURES	vii
LISTE DES PLANCHES	viii
SIGLES ET ABREVIATIONS	ix
RESUME	x
Abstract.....	xi
INTRODUCTION	1
Chapitre I-Synthèse bibliographique	3
I-1-Généralités sur le sorgho	3
I-1-1-Origine, domestication et diffusion	3
I-1-2- Botanique du sorgho	3
a- Systématique	3
b- Description botanique	3
c- Caractérisations agro-morphologique	4
I-1-3- Cycle de développement	5
I-1-3-1 La phase végétative	6
I-1-3-2-La phase reproductive	6
I-1-3-3- La phase de maturation	7
I-1-4- Utilisation et importance socio-économique	7
I-1-5- Exigences écologiques	8
• Exigences édaphiques	8
• Exigences climatiques	8
I-1-6-Contraintes liées à la production du sorgho	8
✓ Contraintes biotiques	8
✓ Contraintes abiotiques	9
I-2- Notion de stress hydrique	9
I-2-1-Impact de la sécheresse sur la production du sorgho	9
I-2-2-Mécanismes de tolérance à la sécheresse du sorgho	9
I-3-Effet du caractère stay green du sorgho sur la tolérance au stress hydrique post-floral	10
I-4-Amélioration variétale du sorgho pour la tolérance à la sécheresse	11
Chapitre II-Matériel et méthodes	12
II-1-Présentation de la zone d'étude	12

II-2 Conditions expérimentales	12
II-2-1- Données climatiques	12
2.1.1. Pluviométrie	12
2.1.2. Température, Humidité relative, insolation et vitesse du vent	13
II-3-Matériel végétal	14
II-4-Dispositif expérimental	14
II-5-Conduite de l'essai	15
II-5-1-Préparation du sol	15
II-5-2-Semis et démariage	15
II-5-3- Fertilisation	16
II-5-4-Récolte et séchage	16
II-6- Paramètres collectés	16
II-6-1-Observations	16
II-6-2-Mesures climatiques	17
II-6-3-Les mesures agro-morphologiques	17
II-6-4-Mesures physiologiques	18
II-6-5-L'humidité du sol	19
II-7-Variables calculées	20
II-8-Collecte et traitement des données	23
Chapitre III-RESULTATS ET DISCUSION	24
III-1-REULTATS	24
III-1-1. Caractérisation du statut hydrique du sol	24
III-1-2. Analyses de variance	25
III-1-2-1. Variables agro-morphologiques	25
III-1-2.2. Variables physiologiques	25
III-1-3. Variabilité de la réponse au stress hydrique	27
III-1-4. Héritabilité des caractères agro-morphologiques liés à la tolérance au stress hydrique	28
III-1-5. Corrélation entre variables	29
III-1-5.1. Corrélacion entre les variables agro-morphologiques et physiologiques	29
III-1-5.2. Corrélacion entre les variables agro-morphologiques, physiologiques et les indices de stress	30
III-1-6. Analyse en composante principale (ACP)	31
III-1-6.1. Caractéristiques des axes factoriels	31
III-1-6.2. Caractérisation des génotypes	32
III-1-7 : Identification des meilleures accessions	34

III.2 Discussion	36
CONCLUSION ET PERSPECTIVES	39
References bibliographies	40
ANNEXES	47

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Analyse de variance avec la significativité de la P-value associée à la moyenne d'essais et l'analyse descriptive des deux essais	26
Tableau 2: Source de variation de la réponse phénotypique au stress hydrique post-floral ...	29
Tableau 3: Corrélations entre les variables agro-morphologiques et physiologiques	29
Tableau 4: Corrélations entre les variables de croissance, physiologique, les composantes du rendement et les indices de stress.....	31

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Morphologie d'un pied de sorgho	4
Figure 2 : Stades de croissance d'un sorgho de 90 jours	6
Figure 3 : Localisation des QTLs responsables du caractère stay-green	11
Figure 4 : Localisation de la zone d'étude	12
Figure 5 : Evolution décadaire des paramètres climatiques : Température, Humidité relative et Insolation au cours de l'essai.	13
Figure 6 : Schéma de développement de la population BCNAM stay green de sorgho	14
Figure 7 : Plan du dispositif expérimental.....	15
Figure 8: Evolution de l'humidité du sol en fonction des jours après semi	24
Figure 9 : Comportement des accessions en fonction de leurs réponses au stress.....	27
Figure 10 : Cercle de corrélation du plan 1-2, 2-3	32
Figure 11 : Contribution des variables sur la formation des axes	32
Figure 12 : Classification hiérarchique ascendante	33
Figure 13 : Répartition des géotypes selon leur potentiel de tolérance au stress hydrique post-floral	34
Figure 14 : Comportement des lignées les mieux adaptées au stress hydrique post-floral en fonction de leur indice de tolérance	35

LISTE DES PLANCHES

Planche 1: Récolte et séchage	16
Planche 2: Floraison et Maturation	17
Planche 3: Mesure de la surface foliaire à l'aide du Sun scan	18
Planche 4: Mesure de la teneur en chlorophylle avec le SPAD-502 Plus.....	19
Planche 5: Mesure de l'humidité du sol à l'aide d'un Diviner 2000.....	20

SIGLES ET ABREVIATIONS

ACP : Analyse en Composantes Principales

ANOVA : Analyse Of Variance (analyse de variance)

ANSD : Agence Nationale de la Statistique et de la Démographie

CHA : Classification Hiérarchique Ascendante

CNRA : Centre National de Recherches Agronomiques

ETM : Evapotranspiration Maximale

FAO : Food and Agriculture Organization of the United Nation (organisation des nations unies pour l'alimentation et l'agriculture)

FTSW : fraction d'eau transpirable du sol par la plante

ISRA : Institut Sénégalais de Recherches Agricoles

JAS : Jours Après Semis

QTL : Quantitative Trait Locus

SSI : Indice de Sensibilité au Stress

SPAD : Système portable d'analyse des données

STI : Indice de Tolérance au Stress

STR : évapotranspiration limitée

UASZ : Université Assane Seck de Ziguinchor

RESUME

Le phénomène du changement climatique se trouve au cœur des préoccupations de la production agricole qui est considérée comme l'un des secteurs les plus affectés par ses conséquences. Pour faire face à ce problème, il serait nécessaire de développer des variétés adaptées et très productives en condition de déficit hydrique. C'est dans cette perspective que s'inscrit cette étude qui vise à identifier les lignées les plus adaptées au stress hydrique post-floral et d'évaluer leur performance. Cette étude a été conduite au Centre National de Recherches Agronomiques de Bambey (CNRA) pendant la contre saison chaude 2023 sur 240 lignées de Sorgho issu des croisements entre les trois variétés élites du Sénégal (Nganda, Golobe et Darou) avec B35 en fonction de deux régimes hydriques (régime normal ETM et environnement stressé STR). Le plan expérimental est un dispositif en blocs incomplets de type alpha lattice (20 x 12) sur 3 répétitions pour chaque condition hydrique. Le stress a été imposé lorsque 75% de floraison est observée en STR et correspond au 81^{ème} jour après semis. Les résultats de l'analyse de variance (ANOVA) ont révélé une grande diversité de réponses des lignées au déficit hydrique post-floral. Il ressort de ces résultats que le stay green est fortement lié à l'indice de tolérance au stress (STI), à la réponse au stress (R%) et au rendement en grains (RdtG) qui sont négativement corrélées à l'indice de sensibilité au stress (SSI). La corrélation positive entre la teneur en chlorophylle et la biomasse en STR montre que la biomasse aérienne est fonction de la teneur en chlorophylle qui est fortement corrélée au stay green. Par ailleurs, cette étude a aussi montré que 45,8% des lignées ont répondu positivement au stress pour le rendement. L'analyse en composante principale (ACP) a permis de classer les génotypes en 4 groupes parmi lesquels le groupe 4 composé de 47 génotypes tolérants au stress hydrique caractérisé par un haut potentiel de production en grains. Parmi ces génotypes, 10 lignées s'expriment le mieux (E212, E194, E147, E163, E169, E166, E20, E198, E227 et E30).

Mots clés : Stress hydrique, Stay green, Sorgho, Tolérance,

Abstract

The phenomenon of climate change is at the heart of the concerns of agricultural production, which is considered to be one of the most affected sectors by the consequences of climate change. Among other things, it leads to rising temperatures, soil impoverishment and drought, and ultimately to growing food insecurity. To this end, a study was carried out at the Centre National of Recherches Agronomiques of Bambey (CNRA) during 2023 counter-hot season on 240 sorghum lines resulting from crosses between the three Senegalese elite varieties (Nganda, Golobe and Darou) with B35 as a function of two water regimes (normal regime ETM and stressed environment STR). The experimental design was an incomplete alpha lattice block design (20 x 12) with 3 replications for each water regime. Stress was imposed when 75% flowering was observed in STR, corresponding to the 81st day after sowing. The results of the analysis of variance (ANOVA) revealed a wide range of accessions' responses to post-flowering water deficit. In fact, an increase was noted compared to the stressed environment for all the variables considered, except height (HSS), biomass (RdtBiom), thousand kernel weight (PMG) and chlorophyll content and accumulation. These results show that stay green is strongly correlated with the stress tolerance index (STI), stress response (R%) and yield (RdtG) and its components (PMG, RdtBiom), which are negatively correlated with the stress sensitivity index (SSI). The positive correlation between chlorophyll content and STR biomass shows that above-ground biomass is a function of chlorophyll content, which is strongly correlated with stay green. The study also showed that 45.8% of lines responded positively to yield stress. Principal component analysis (PCA) was used to classify the genotypes into 4 groups, including group 4 made up of 47 water-stress-tolerant genotypes characterized by high grain production potential. Among these genotypes, 10 lines are the most expressive (E212, E194, E147, E163, E169, E166, E20, E198, E227 and E30). For breeders, they can be sources of tolerance in drought adaptation improvement programs, and for farmers, good material to address the hazards of climate change.

Key words: Water stress, Stay green, Sorghum, Tolerance

INTRODUCTION

Le changement climatique est l'une des principales raisons de l'insécurité alimentaire grandissante dans le monde. Il impacte directement la production agricole notamment la production céréalière mondiale et plus particulièrement en Afrique Sub-saharienne. En Afrique, les rendements céréaliers rustiques sont inférieurs à la moitié de la moyenne mondiale (Ndiaye & Diatta, 2021). Selon Shah *et al* (2008), tous les scénarii climatiques montrent que le Sénégal fait partie des pays d'Afrique Sub-Saharienne qui perdront d'ici 2080 leur production céréalière potentielle d'une baisse de 5 à 25% des rendements simulés (Garcia, 2015). Depuis quelques années, le pays assiste à des variations irrégulières de son climat. En effet, il est noté de plus en plus un déficit pluviométrique qui influence directement les niveaux de production agricole entraînant ainsi la baisse de la productivité ou des rendements (Ahmadou, 2014 ; Faye *et al.*, 2018). Au Sénégal, l'agriculture est caractérisée par un déficit chronique de la production céréalière notamment le sorgho.

En effet, cette céréale principalement cultivée dans les régions arides et semi-arides est la cinquième la plus importante en termes de production au niveau mondial après le maïs, le riz, le blé et l'orge et occupe la deuxième position parmi les principales céréales de base après le maïs en Afrique sub-saharienne (Mohammed *et al.*, 2018). Ainsi, il constitue la principale source d'énergie, de protéines, de vitamines et de minéraux pour plus de 500 millions de personnes dans les pays en développement, en Afrique, en Asie et au Moyen Orient (Liu *et al.*, 2019). Le sorgho est la base de nombreux plats sénégalais et est valorisé dans la panification par remplacement partiel, environ 20 à 30% de la farine de blé en pain (Diatta *et al.*, 2019). Il est aussi utilisé pour la formulation d'aliments de volaille. Son fourrage est utilisé pour confectionner des balais, des clôtures de maisons mais également pour l'alimentation du bétail (Fall *et al.*, 2016).

Cependant, la principale contrainte de sa production affectant ainsi sa qualité, sa croissance et son développement reste le déficit hydrique (Ahmad *et al.*, 2018). En effet la sécheresse est une contrainte majeure de la production céréalière dans beaucoup de régions. Sa fréquence et son intensité ont augmenté dans la plupart des régions arides et semi-arides selon les prévisions faites sous différents scénarii de changements climatiques futurs ((Ladoui *et al.*, 2020). Partant de là, d'importants efforts d'amélioration du matériel génétique ont été faits au Sénégal par les programmes d'amélioration variétale sur la tolérance du sorgho au stress hydrique pré et post-floral (Sine, 2009; Sene, 2019; Bodian, 2020; Senghor, 2021). Néanmoins, ces travaux d'amélioration ont été pour la plupart basés sur des collections de sorgho. C'est ainsi qu'une population de lignées stay-green a été développée à cet effet pour mieux appréhender le

mécanisme de tolérance à la sécheresse. L'objectif général de cette étude est de contribuer à l'amélioration génétique des variétés de sorgho du Sénégal pour la tolérance à la sécheresse.

De façon spécifique, elle vise à :

- déterminer la variabilité génétique qui existe au niveau de la population stay-green
- examiner les relations existantes entre les différentes variables étudiées
- Identifier les variables potentiellement liées à la tolérance au déficit hydrique de fin de cycle
- identifier les lignées les plus performantes face au stress hydrique post-floral.

Ce document est composé de trois chapitres. Le premier chapitre est consacré à la synthèse bibliographique. Le deuxième chapitre présente le matériel et les méthodes employés dans le cadre cette étude. Le troisième chapitre traite les résultats et la discussion.

Chapitre I-Synthèse bibliographique

I-1-Généralités sur le sorgho

I-1-1-Origine, domestication et diffusion

Le sorgho est l'une des plantes les plus anciennement cultivées dans le monde mais son origine est toujours un sujet de controverse. En effet, Harlan et de Wet (1972) proposent une origine africaine où le sorgho aurait été domestiqué il y a environ 3000 ans avant Jésus Christ (J.C) dans une vaste zone de savane en bordure Sud du Sahara, vraisemblablement en Ethiopie. Tandis que Chantereau *et al.* (2013) stipulent que, les premiers restes archéologiques identifiés de sorghos cultivés en Afrique ont été trouvés en Nubie et datent du premier millénaire avant J.C. Ils ont été reconnus de race bicolor en adéquation avec l'antériorité supposée de cette race aux caractères les plus primitifs. En fait, leur domestication pourrait dater du troisième millénaire avant J.C.

De son centre d'origine, le sorgho aurait suivi les migrations humaines pour atteindre l'ensemble du continent Africain (Sene, 2019 ; Deu *et al.*, 2006). D'autres plus récentes ont ensuite étendu l'aire de culture du sorgho vers l'Asie, depuis 3000 ans en Inde d'abord puis en Chine, vers l'Amérique et l'Australie (Kante, 2011).

I-1-2- Botanique du sorgho

a- Systématique

La plupart des sorghos cultivés appartiennent à l'espèce *Sorghum bicolor* (L.) Moench, plante monocotylédone annuelle de la famille des Poacées, sous famille des Panicoidés, tribu des Andropogonées et au genre *Sorghum*. C'est une espèce diploïde à nombre chromosomique de base $n = 10$ (Chantereau *et al.*, 2013).

Selon Doggett (1988), il se divise en cinq sections parmi lesquelles se trouve la section *Sorghum* composée de 3 espèces : 2 espèces sauvages et pérennes (*S. halepense* et *S. propinquum*) et une espèce annuelle (*S. bicolor*). Cette dernière comprend les sorghos cultivés (*ssp. Bicolor*), les sorghos adventices (*ssp. Drummondii*) et les sorghos sauvages (*ssp. Arundinaceum*, *ssp. Verticilliflorum*). *S. bicolor* est diploïde ($2n = 20$). *S. halepense* est une espèce tétraploïde ($2n = 4x = 40$) qui peut s'hybrider avec les sorghos cultivés pour donner l'espèce *S. almumm*.

b- Description botanique

Le sorgho appartient à la famille des Poacées comme le maïs, la canne à sucre ou le riz. Il 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 : ce dernier est constitué d'une feuille, d'un nœud portant un bourgeon axillaire et d'un entre-nœud développé en dessous du nœud (Chantereau *et al.*, 2013). Son inflorescence est une panicule qui est constituée d'un axe central, le rachis, d'où partent des branches primaires (Sine, 2009). Il possède un système racinaire puissant qui explique en grande partie sa capacité à supporter des aléas importants en matière d'alimentation en eau (Figure 1).

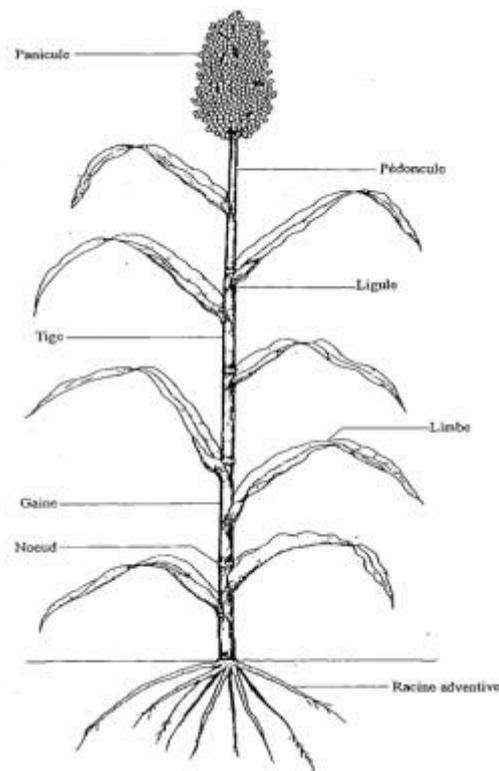


Figure 1 : Morphologie d'un pied de sorgho (Sine, 2009)

c- Caractérisations agro-morphologiques

Une grande diversité morphologique existe chez les variétés cultivées de sorgho. L'identification des races est basée sur la structure de l'épillet, la forme du grain et le type d'inflorescence. Harlan et de Wet (1972), ont établi une classification simplifiée qui distingue cinq races principales :

- ✓ La **race bicolor** est considérée comme la première race de sorgho domestiquée notamment parce qu'elle présente un certain nombre de caractères peu évolués. Ainsi, les grains des sorghos de race bicolor sont petits, elliptiques et recouverts par des glumes coriaces. Les panicules sont le plus souvent lâches comme chez les sorghos sauvages. Leur capacité de tallage peut être élevée. Les variétés de sorghos bicolor ont souvent

une tige sucrée. Ils se trouvent dans toutes les aires de culture du sorgho mais généralement sur de petites surfaces.

- ✓ Les sorghos de **race guinea** se distinguent par leurs grains elliptiques, plus ou moins aplatis dorso-ventralement et insérés dans des glumes longues et largement ouvertes à maturité. Ce dernier trait leur est propre. Selon les variétés, la taille du grain chez les sorghos guinea varie de petite à grosse. Leurs panicules sont plutôt longues, lâches à semi-lâches. Les sorghos guinea dominent dans les aires les plus humides de la culture du sorgho comme dans la zone sud-soudanienne et nord guinéenne de l'Afrique de l'Ouest.
- ✓ La **race caudatum** est caractérisée par des grains dissymétriques, dit en carapace de tortue, avec une face bombée et l'autre plate. Leurs glumes, de taille inférieure aux grains, sont adhérentes à ces derniers. Leurs panicules semi-compactes à compactes ont souvent une forme fusoïde ou oblongue. Les sorghos caudatum sont plus particulièrement présents en Éthiopie, au Soudan, au Tchad et au Nigeria.
- ✓ Les sorghos de la **race durra** ont des panicules compactes, souvent portées par un pédoncule crossé. Leurs grains sont gros, globuleux, pris dans des glumes peu couvrantes, larges. Les durra sont les sorghos des régions sèches (Maghreb, Asie mineure, Inde) ou des cultures de contre-saison traditionnelles (vallées du Sénégal et Niger, bassin du lac Tchad) car ils sont tolérants à la sécheresse et à la chaleur.
- ✓ Les sorghos de la **race kafir** ont des grains de taille moyenne et de forme elliptique. Leurs glumes sont courtes et adhérentes. Leurs panicules modérément compactes sont plutôt longues, dressées et de forme cylindrique. Les sorghos kafir sont originaires d'Afrique australe où ils sont restés cantonnés jusqu'à récemment. Aussi, la race kafir est considérée comme la plus récente de toutes.

I-1-3- Cycle de développement

Le développement du sorgho comprend, d'une manière générale, trois phases principales (Figure 2) :

- La phase végétative qui débute de la levée à l'initiation paniculaire ;
- La phase reproductive qui commence de l'initiation paniculaire à la floraison ;
- La phase de remplissage et de maturation des graines allant de la floraison à la maturité physiologique.

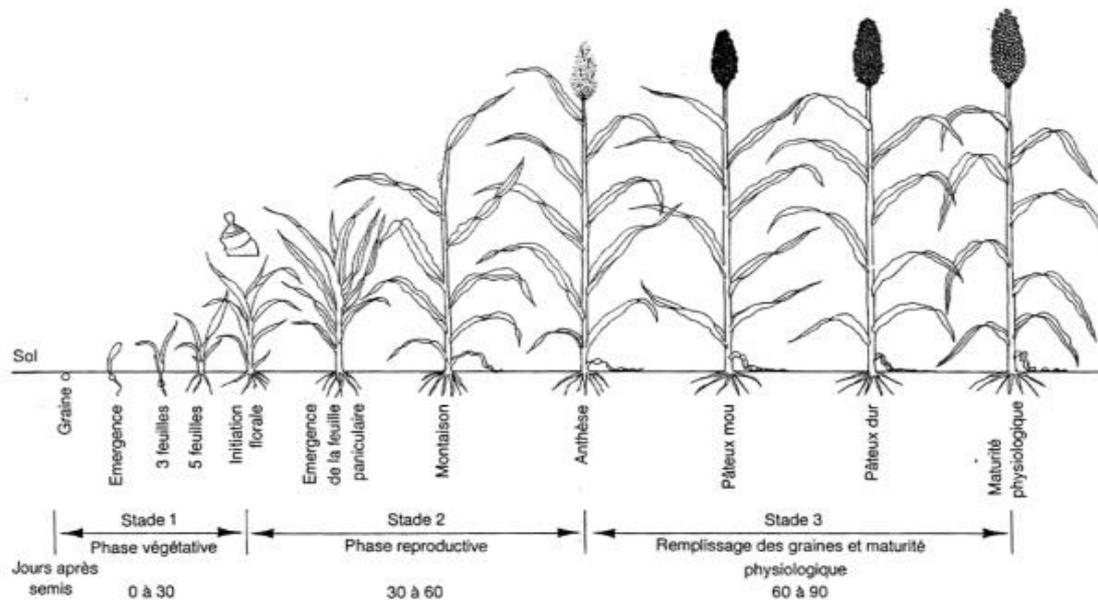


Figure 2 : Stades de croissance d'un sorgho de 90 jours (Sine, 2009)

I-1-3-1- La phase végétative

Les graines de sorgho cultivé n'ont habituellement pas de dormance. Elles germent dès que les conditions de température et d'humidification du sol conviennent. C'est le début de la phase végétative (Chantereau *et al.*, 2013). Elle dure 3 à 4 jours après le semis en zone tropicale et une à deux semaines en conditions plus froides de contre-saison ou dans les régions tempérées (Chantereau et Nicou, 1991). La jeune plante commence sa croissance en produisant des feuilles, la coléoptile restant à la base du pied sous forme de gaine. Le mésocotyle croît durant cette période et un nœud se forme à la base de la coléoptile juste en dessous de la surface du sol. Des racines secondaires commencent à se développer au niveau de ce nœud 3 à 7 jours après l'émergence du plant. Un système racinaire plus important se développe à partir des racines secondaires ou adventives. Le mésocotyle commence à disparaître à peu près au moment où les racines secondaires ont commencé à se développer (House, 1987).

I-1-3-2-La phase reproductive

L'initiation de la panicule est le stade qui marque la fin de la phase végétative, par différenciation du bourgeon végétatif ou méristème apical en méristème ou bourgeon floral. Elle se produit généralement lorsque la plante est haute de 50 à 60 cm et se poursuit pendant toute la période reproductrice, jusqu'à la floraison (Sine, 2009). La floraison se déroule par étapes successives, du sommet vers le bas de la panicule, durant une période de quatre à cinq jours. Elle dure entre 4 et 9 jours selon la variété, la taille de la panicule, l'humidité de l'air et la température. Au moment de la floraison des glumes s'ouvrent et les trois anthères pendent

librement. Les deux stigmates sont émis, portés chacun par un style rigide. Les anthères effectuent leur déhiscence lorsqu'elles sont sèches mais pas en condition de forte rosée ou de pluies, et le pollen est entraîné dans l'air. Au début de son développement, l'ovule a l'aspect d'une sphère vert clair à presque crème. Après dix jours il prend du volume et passe au vert foncé (House, 1987).

I-1-3-3- La phase de maturation

Selon Chantereau *et al.*, (2013), les graines atteignent la maturité physiologique au bout de 30 à 50 jours après la fécondation. Durant son développement la graine passe par trois étapes : stades laiteux, début pâteux, fin pâteuse. A la fin de son cycle, le sorgho voit ses feuilles sécher et tomber progressivement, les premières à le faire étant les plus anciennes. Il existe de nettes différences variétales dans le taux de sénescence des feuilles qui persistent. Cette sénescence peut commencer lors du remplissage du grain ou bien après. Toutes les feuilles peuvent avoir séché ou presque séché, au moment où le grain est mûr, ou le plant entier peut encore rester vert (Sine, 2009) : c'est le caractère "stay-green".

I-1-4- Utilisation et importance socio-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 (Cissé, 2001). Essentiellement cultivé pour son grain, il occupe la 5^{ème} place des céréales sèches la plus cultivée dans le monde après le blé, le riz, le maïs, et l'orge. Selon FAOSTAT (2021), la production mondiale en 2021 a été estimée à 6,1 millions de tonnes pour une superficie de 40925310 ha. 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. En Afrique de l'Ouest, la superficie cultivée était de 13737918 ha en 2021 avec un rendement de 9341 kg à l'hectare. Au Sénégal, il est cultivé un peu partout à des degrés divers et constitue avec le mil la base de l'alimentation des populations rurales. Pour la campagne 2022/2023, sur une superficie de 270 168 ha, le rendement obtenu est de 1 344 kg/ha (ANSD, 2023).

Le grain peut être consommé entier. Il peut aussi être décortiqué et transformé en farine pour faire des bouillies et pâtes comme le tô en Afrique de l'Ouest, le couscous, les beignets ou les galettes. Le grain peut également être fermenté pour donner des boissons alcoolisées comme la bière traditionnelle d'Afrique de l'Ouest ou le vin de sorgho en Chine (Cissé, 2001). Plus récemment, des variétés ont été utilisées aux Etats-Unis, en Europe et en Amérique du Sud,

comme au Brésil, pour une culture plus intensive, ciblant généralement l'alimentation animale, puis à des fins énergétiques grâce aux sorghos sucrés (Antonopoulou *et al.*, 2008).

I-1-5- Exigences écologiques

- **Exigences édaphiques**

Le sorgho est sensible aux excès d'humidité et de ce fait doit être réservé aux sols riches, profonds, drainables et à texture fine. Il exige une teneur minimale de 6% en argile, la meilleure situation étant celle d'un sol sablo-argileux, profond, bien drainé (Granes, 1995). Il a une tolérance modérée au sel, un peu moins que le blé, mais plus que le maïs. Il est sensible à la toxicité à l'aluminium et aux sols acides.

- **Exigences climatiques**

Le sorgho présente une photosynthèse de type C4, qui est une adaptation des plantes de milieu tropical permettant une conversion du carbone en assimilât carbonés plus efficace (Perrier, 2017). Pour germer, il demande un sol humide et des températures moyennes journalières supérieures à 12°C. Si les conditions sont bonnes ($T > 20^{\circ}\text{C}$), les semences lèvent en trois ou quatre jours. Ses besoins en eau varient de 350 à 750 mm en fonction de la longueur du cycle (Chantereau et Nicou, 1991). Selon House (1987), la phase où le sorgho est plus exigeant en eau est la phase de floraison, il peut consommer 6 à 7 mm d'eau par jour et a besoin de 332 Kg d'eau pour produire 1 Kg de matière sèche.

I-1-6-Contraintes liées à la production du sorgho

La production du sorgho est négativement affectée par divers facteurs biotiques et abiotiques conduisant à une réduction sévère de la productivité.

- ✓ **Contraintes biotiques**

En raison de sa diffusion mondiale et de son acclimatation à une grande diversité d'environnements, le sorgho en culture a de nombreux bioagresseurs de tous types. Il s'agit entre autres des maladies qui affectent la panicule telles que les moisissures des grains (Diatta *et al.*, 2019) ; le charbon allongé ; le charbon de la panicule et la pourriture sèche de la panicule. Toutes ces maladies ont pour effet la destruction des fleurs ou des graines et sont favorisées par les périodes chaudes et humides. Leur sévérité est fonction de la précocité de l'infection et de la sévérité du stress hydrique associé. Hormis ces maladies, on note aussi la présence d'insectes ravageurs comme les foreurs de tiges, la mouche des pousses, les chenilles défoliatrices et les pucerons qui causent d'énormes dégâts (Dakouo *et al.*, 2005). A cela s'ajoutent les attaques des adventices et spécialement de *Striga hermontica* (Hoffmann *et al.*, 1997) qui dans certaines

régions constituent une contrainte sérieuse pour la production. Les oiseaux en se nourrissant des grains, peuvent aussi constituer un sérieux problème.

✓ **Contraintes abiotiques**

Parmi les différentes contraintes abiotiques, la sécheresse et la température élevée sont les facteurs qui induisent le plus d'effets négatifs sur les productions agricoles. Cependant, la sécheresse est celui qui cause certainement le plus de dommages dans la production de sorgho (Bretaudeau *et al.*, 1994; Diatta *et al.*, 2019).

I-2- Notion de stress hydrique

Le stress hydrique est l'un des stress environnementaux le plus importants, affectant la productivité agricole autour du monde. Selon Sine (2003), c'est l'état dans lequel la transpiration de la plante est supérieure à sa capacité d'absorption ou de transport de l'eau dans les feuillages. En effet, on assiste à un stress hydrique lorsque la demande en eau dépasse la quantité disponible pendant une certaine période ou lorsque sa mauvaise qualité en limite l'usage (Melle et Mouellef, 2010). Chez le sorgho, deux types de réponses au stress hydrique ont été identifiés et décrits et qui sont probablement contrôlés par des mécanismes génétiques : la réponse hydrique pré-florale et la réponse hydrique post-florale (Hud *et al.*, 2016).

I-2-1-Impact de la sécheresse sur la production du sorgho

La sécheresse constitue une menace permanente pour la survie des plantes, elle représente le stress abiotique le plus sévère, auquel la plante fait face dans les conditions de productions des zones arides et semi-arides (Chennafi *et al.*, 2006). Il peut se définir comme le rapport entre la quantité d'eau nécessaire à la croissance de la plante et la quantité d'eau disponible dans son environnement, sachant que la réserve d'eau utile pour la plante est la quantité d'eau du sol accessible par son système racinaire (Laberche, 2004). Il peut engendrer des conséquences dommageables sur le rendement du sorgho malgré sa tolérance au déficit hydrique et son utilisation efficace et économe de l'eau (Almodares et Hadi, 2009). En effet, lorsque les plants sont stressés, ils rencontrent des difficultés à accomplir leurs fonctions photosynthétiques. Si les activités photosynthétiques sont réduites, cela peut avoir un impact sur le rendement (Josephine *et al.*, 2020). Ils confirment que la sécheresse réduit la taille et la longueur des épis du sorgho. Ce qui influe son rendement.

I-2-2-Mécanismes de tolérance à la sécheresse du sorgho

La tolérance à la sécheresse est un caractère très complexe. Pour chaque type de sécheresse, plusieurs mécanismes de tolérance peuvent être mis en place. En effet, May et Milthorpe (1962)

avaient mis en place une classification. Elle considère trois grands types de réponse à la sécheresse : l'esquive, la tolérance par maintien d'un potentiel hydrique élevé, ou évitement, et la tolérance à un potentiel hydrique bas, ou tolérance vraie.

- L'esquive permet à la plante de ne pas subir directement de contraintes hydriques en réalisant son cycle en dehors des périodes sèches. Ce mécanisme n'est pas systématiquement considéré comme une véritable forme d'adaptation.
- L'évitement consiste, pour la plante, à maintenir un état hydrique interne satisfaisant en présence d'une contrainte hydrique externe.
- La tolérance enfin permet à la plante d'assurer normalement ses fonctions physiologiques malgré une dégradation de son état hydrique interne consécutive à la sécheresse.

I-3-Effet du caractère stay green du sorgho sur la tolérance au stress hydrique post-floral

La résistance à la sécheresse est d'une grande importance en production végétale. L'identification de facteurs génétiques impliqués dans la réponse des plantes face à la sécheresse constitue un point de départ en vue d'améliorer la tolérance à la sécheresse. Chez le sorgho grain cette résistance a été étudiée durant la phase post-florale et il a été montré que le stay-green participait à ce phénomène (Fracasso *et al.*, 2016). Le Stay-green consiste au maintien d'un certain nombre de feuilles vertes après la floraison pour assurer un bon remplissage des grains en composés azotés et en sucres. Ce caractère a été ciblé par des programmes de sélection australiens qui ont permis le développement de sorgho plus petits mais plus vigoureux, et assurant une récolte de qualité (Gaufichon *et al.*, 2010). De nombreuses variétés de sorgho sont stay-green et ont la particularité de conserver une plus grande partie de leurs feuilles vertes durant la phase de reproduction. Il a été montré que les variétés stay-green présentaient sous déficit hydrique un rendement en grain supérieur (Borrell *et al.*, 2014). Une étude génétique par Vadez *et al.* (2011) a montré que les QTLs associés au phénotype stay-green contrôlaient des traits liés à l'utilisation et à l'absorption de l'eau par le sorgho. Xu *et al.*, (2000) ont identifié quatre QTLs de persistance chlorophyllienne, lesquels sont situés sur trois groupes de liaison (Figure 3). Deux QTLs (Stg1 et Stg2) appartiennent au groupe de liaison A tandis que les deux autres (Stg3 et Stg4) appartiennent respectivement aux groupes D et J. Trois des QTLs, Stg1, Stg2 et Stg3, sont responsables, respectivement, de 20 %, 30 % et 16 % de la variation phénotypique (Sanchez *et al.*, 2002).

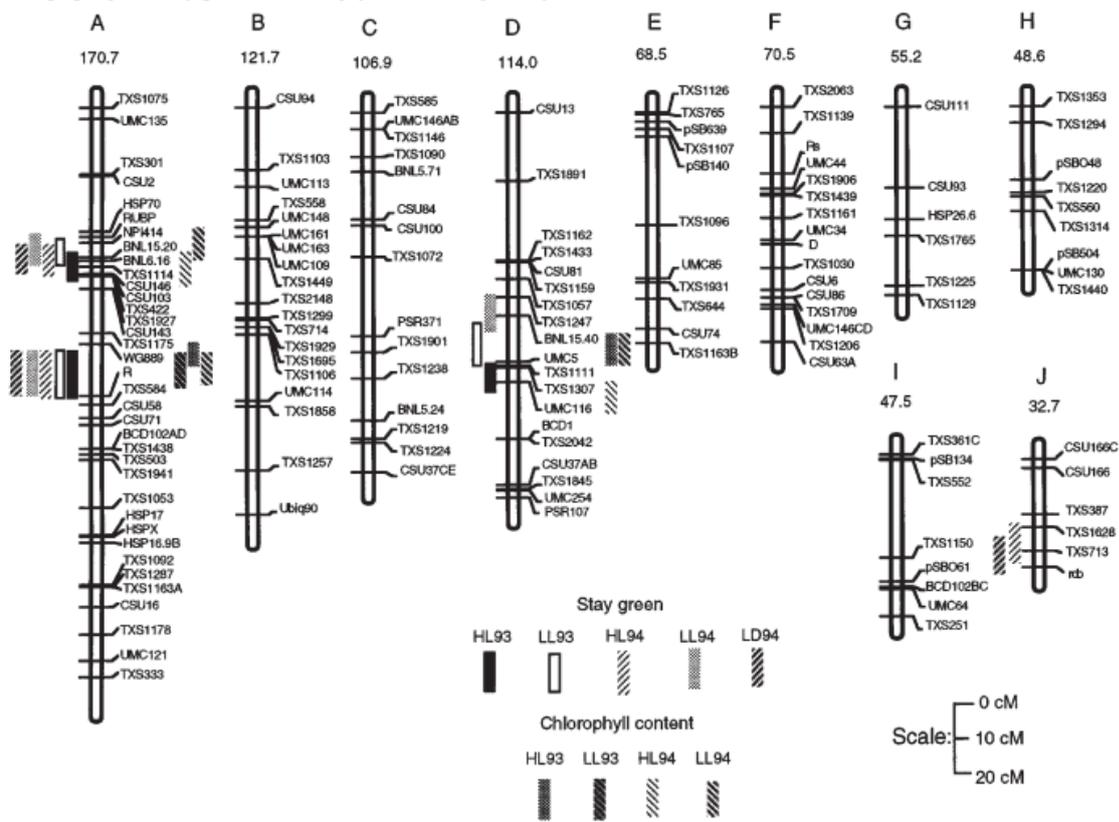


Figure 3 : Localisation des QTLs responsables du caractère stay-green (Xu et al., 2000)

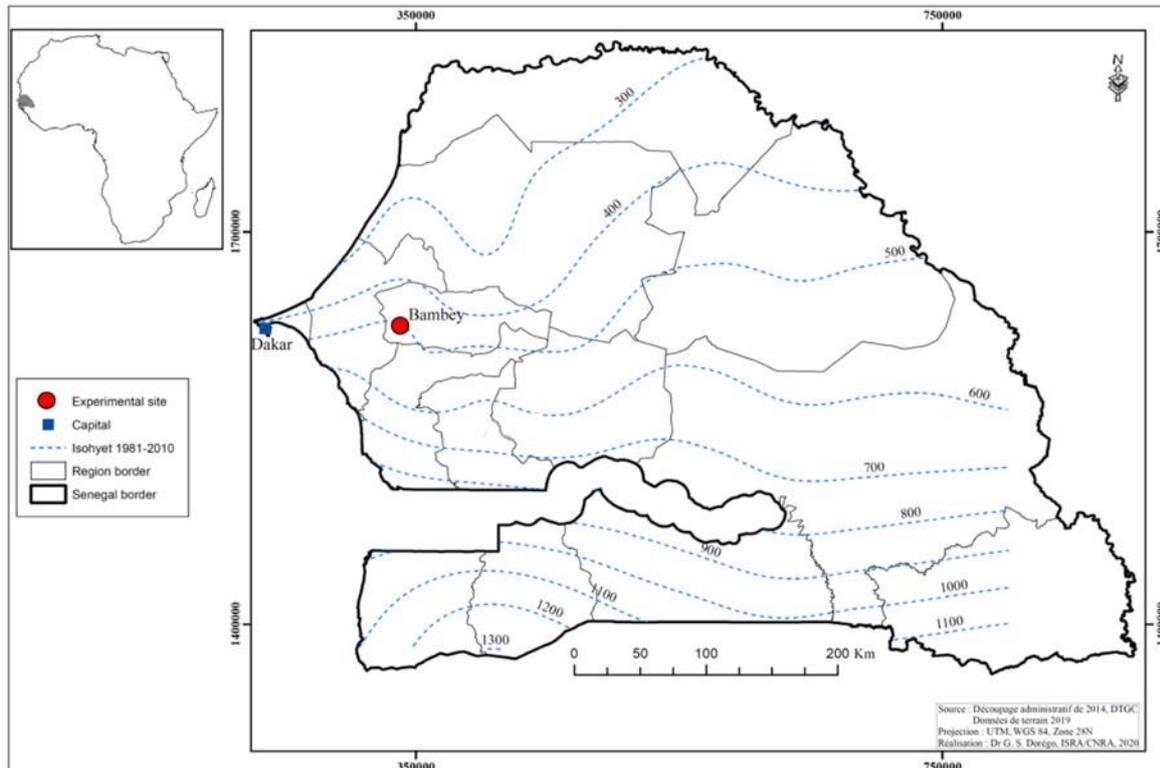
I-4-Amélioration variétale du sorgho pour la tolérance à la sécheresse

Le sorgho est étudié au Sénégal depuis les années 1950. A partir de 1960, il a fait l'objet d'une sélection plus intensive mais les objectifs étaient encore mal définis. C'est à partir de 1965-1967 que, les objectifs étant bien définis et l'introduction d'excellents géniteurs de la collection mondiale réalisée, un programme complet intensifié en 1970 a pu être conduit. En 1974 l'amélioration des sorghos à cycle total de 120 à 125 jours et la recherche d'un sorgho à cycle court résistant aux moisissures pour le sud du Sénégal ont été confiés à un deuxième sélectionneur (Mauboussin *et al.*, 1977). Avec le phénomène des changements climatiques, les objectifs d'amélioration commencent à évoluer et tendent plus spécifiquement sur l'adaptation et la productivité en condition de stress hydrique (Sene, 2019 ; Senghor,2021). A ce propos, de nombreuses études ont été menées. On peut en citer les travaux de Sine (2009) sur la core collection mondiale, ceux de Akata (2017) sur la collection Ouest Africaine WASAP, Bodian, (2020) sur la collection nationale de sorgho du Sénégal.

Chapitre II-Matériel et méthodes

II-1-Présentation de la zone d'étude

L'étude a été conduite au niveau de la station expérimentale du centre National de Recherches Agronomiques (CNRA) de Bambey (Figure 4) pendant la contre saison chaude 2023 (Février à Juin). Le CNRA se trouve à 14°42' latitude Nord ; 16°28' longitude Ouest et est caractérisé par un climat désertique chaud et sec.



Source : Découpage administratif de 2014

Figure 4: Localisation de la zone d'étude

II-2- Conditions expérimentales

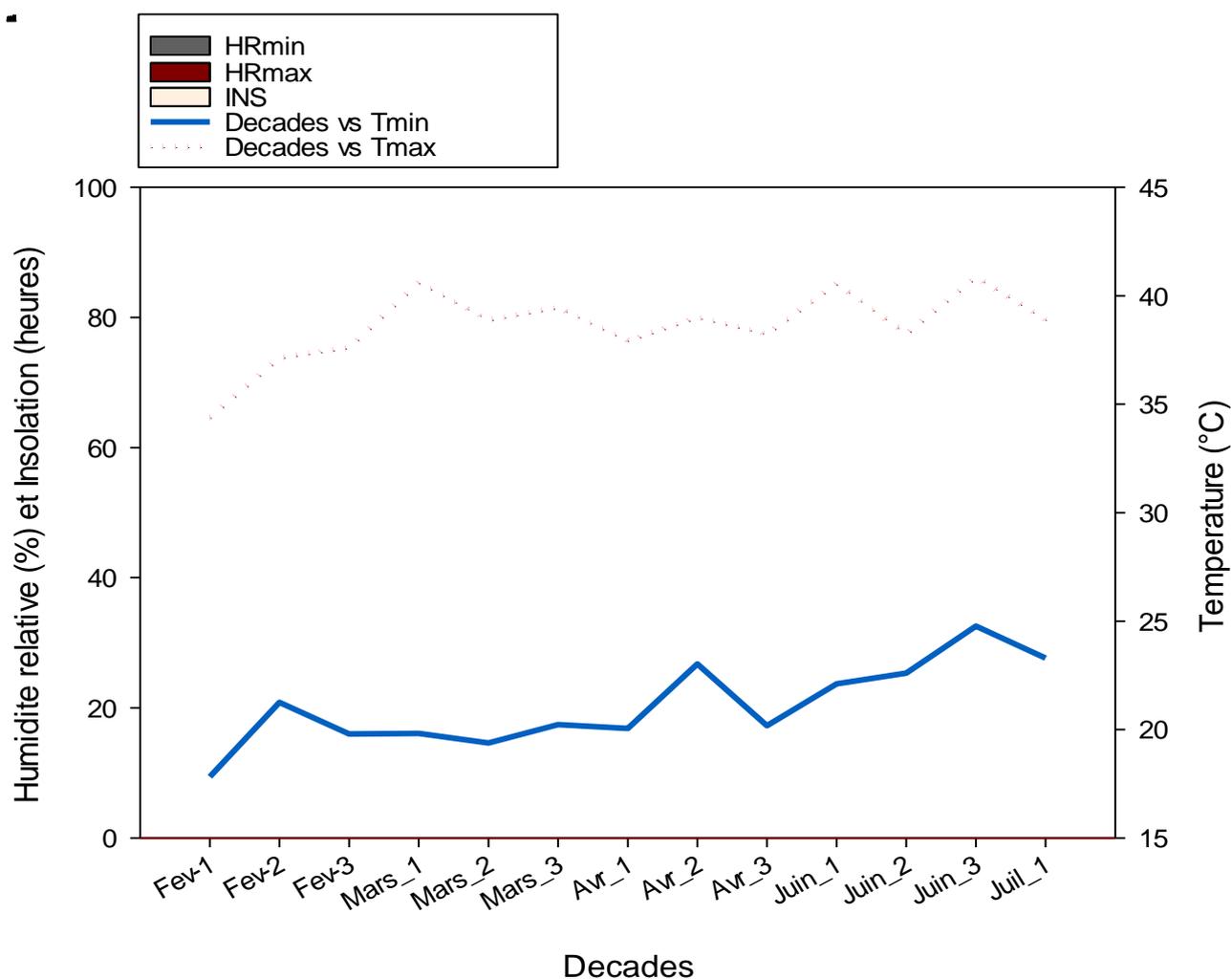
II-2-1- Données climatiques

2-1-1- Pluviométrie

La quantité d'eau reçue par irrigation durant la période du 16 Février au 8 Mai pour l'essai STR était de 680 mm en raison de 40 mm par semaine. L'essai ETM a reçu 800 mm d'eau par irrigation durant toute la période de l'essai.

2-1-2- Température, Humidité relative, insolation et vitesse du vent

Au cours de l'essai, les moyennes décadaires des températures maximales ont varié entre 34,4°C à 40,87°C et les minimales quant à elles, ont varié de 17,82°C à 24,77°C. L'humidité relative maximale a varié entre 54,3 à 92,5% tandis que les minimales ont varié de 12,7 à 32,8%. Quant à l'insolation, elle a varié de 5,84 à 9,96 heures (Figure 5).



HRmax : humidité relative maximale, *HRmin* : humidité relative minimal, *INS* : insolation, *Tmax* : température maximale, *Tmin* : température minimale.

Figure 5: Evolution décadaire des paramètres climatiques : Température, Humidité relative et Insolation au cours de l'essai.

II-3-Matériel végétal

Le matériel végétal utilisé est une population stay-green de sorgho composée de 234 lignées avec 4 lignées parentales (Golobé, Darou, Nganda et B35), un (1) contrôle négatif (Tx7000) et un (1) control positif (CE145-66). Cette population a été obtenue en croisant les trois variétés élités (Golobé, Darou, Nganda) avec B35 qui constitue le parent donneur du caractère stay-green. Les parents ont été choisis sur la base de la tolérance à la sécheresse (B35), du potentiel de rendement élevé, de la résistance aux maladies et parasites, de la qualité de grain (Nganda, Darou et Golobé) et de la maturité précoce (Golobé). Trois rétrocroisements ont été effectués pour les croisements entre Golobé × B35 et Darou × B35 et un seul rétrocroisement entre Nganda × B35. A chaque rétrocroisement, un génotypage a été effectué pour identifier les lignées qui ont reçu les allèles (QTL) de stay-green. Ainsi, les individus qui composent ce matériel végétal sont produits à partir de ces trois sous-populations qui constituent la population BCNAM (Population de cartographie d'association intercroisée) de sorgho (Figure 6).

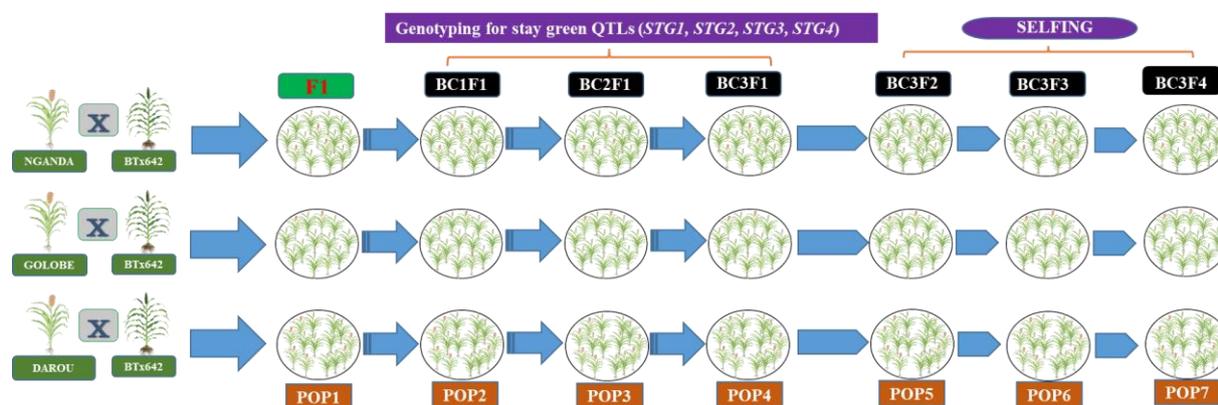


Figure 6: Schéma de développement de la population BCNAM stay-green de sorgho

II-4-Dispositif expérimental

L'étude a été effectuée sur deux environnements [environnement contrôlé (ETM) et environnement stressé (STR)] qui constituent le facteur régime hydrique et un facteur génotype composé de 240 niveaux (lignées recombinantes). Les essais ont été installés suivant un dispositif expérimental en blocs incomplets de type alpha lattice avec trois répétitions dont 20 blocs de 12 parcelles chacune (Figure 7). La parcelle élémentaire est composée de deux lignes de 2 m chacune avec un espacement entre les lignes de 0,8 m et 0,2 m entre les poquets de la même ligne. Ainsi, 10 plants ont été semés au niveau de chaque ligne, soit 20 plants par parcelle élémentaire. La superficie totale était de 3818,24 m² pour chaque environnement.

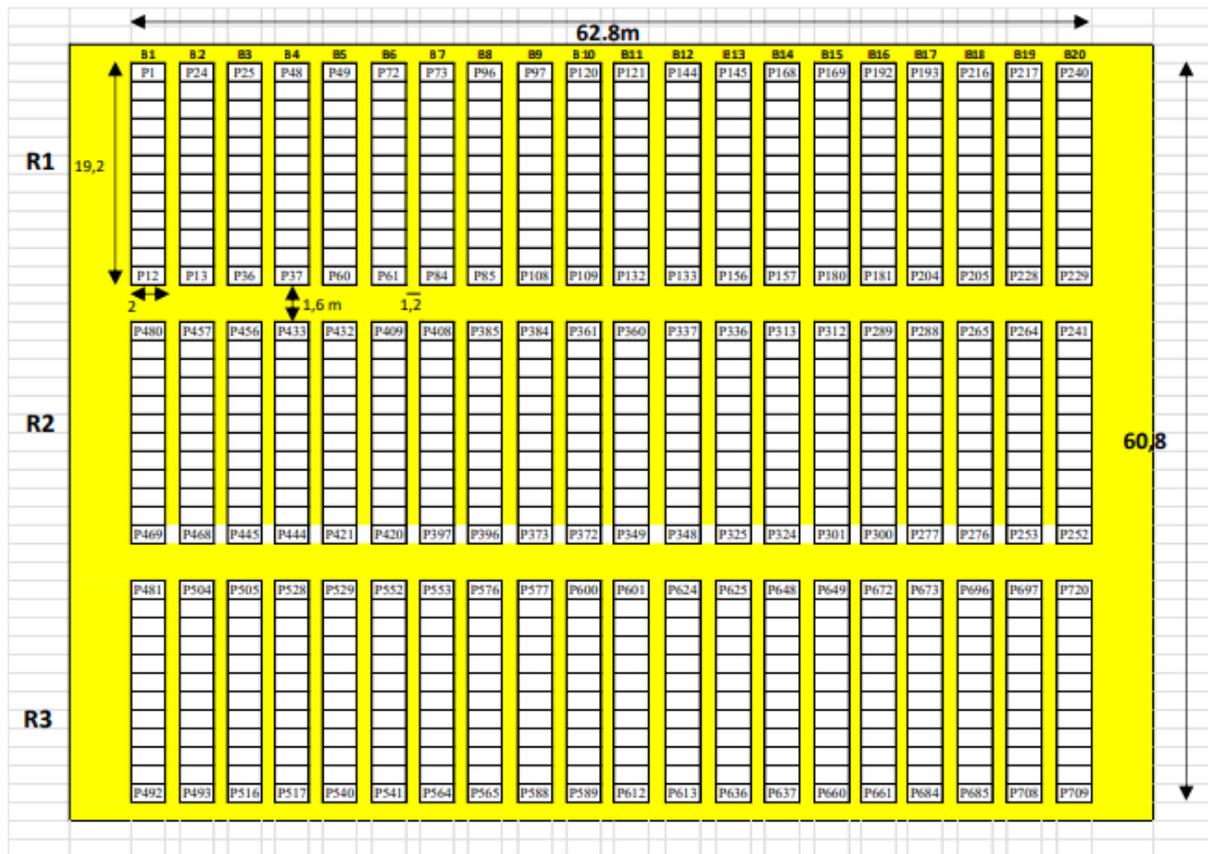


Figure 7: Plan du dispositif expérimental

II-5-Conduite de l'essai

Les essais ont été mis en place en février 2023 à la station expérimentale du CNRA de Bambeby. Pour l'environnement control, l'irrigation a été appliquée deux fois par semaine (40 mm). Pour l'environnement stressé, elle a été arrêtée à la floraison lorsque 75% des lignées sur l'ensemble de la parcelle ont fleuri.

II-5-1-Préparation du sol

Un léger labour au tracteur d'une profondeur de 20 cm a été effectué pour aérer le sol. Il a été suivi d'un hersage pour avoir un bon lit de semis.

II-5-2-Semis et démarrage

Le semis en raison de 4 grains par poquet a eu lieu le 16 février 2023 pour les deux essais. Au 15^{ème} jour après semis (JAS), un démarrage à 2 plants par poquet a été réalisé. Juste après le démarrage, le premier sacro-binage a été effectué.

II-5-3- Fertilisation

Juste après le semis, un épandage d'engrais de fond NPK (15-15-15) a été fait à raison de 150 kg / ha de façon homogène au niveau de chaque essai. L'apport d'engrais de couverture (urée) à hauteur 100 kg/ha a été effectué après démariage (50%) et pendant la phase de montaison (50%).

II-5-4-Récolte et séchage

La récolte a été réalisée à la maturité physiologique sur les carrés de rendement de chaque parcelle élémentaire à l'aide de sécateurs. Elle a eu lieu le 26 juin pour STR et le 6 juillet pour ETM. Après la récolte, les panicules ont été séchées au niveau de l'aire de séchage puis pesées pour avoir le poids des panicules (PPan) avant de procéder au battage manuel (Planche 1)



Planche 1: Récolte et séchage

II-6- Observations et Mesures

II-6-1-Observations

- **Date de floraison** : Elle est notée lorsque 50% des plants de la parcelle élémentaire ont fleuri. La floraison est atteinte lorsque les premiers stigmates apparaissent au sommet de la panicule (planche 2 b).
- **Maturité physiologique** : Elle est prise lorsque 50% des plants de la parcelle élémentaire sont matures (apparition de point noir dans la région du hile)(House, 1987) (planche 2 a) .

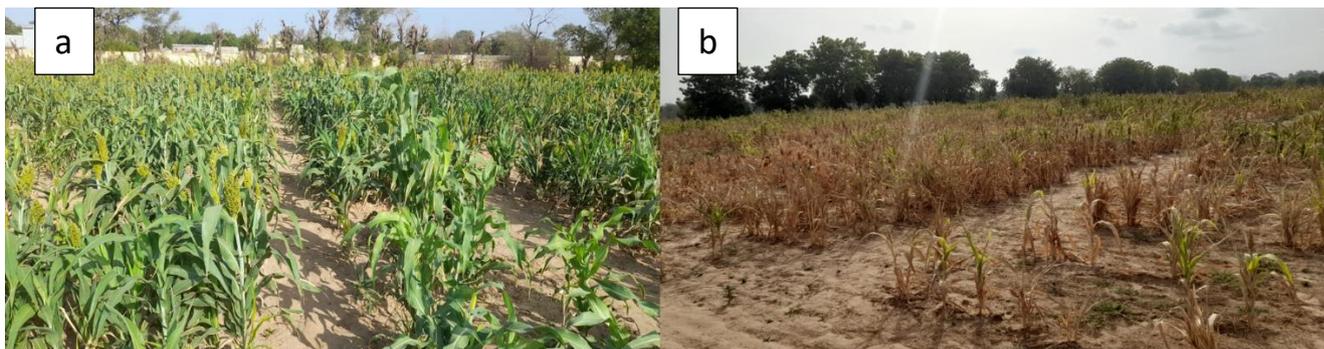


Planche 2: Floraison (a) et Maturation (b)

II-6-2-Mesures climatiques

Les données climatiques, notamment l'humidité relative et la température ont été enregistrées quotidiennement à partir de la station météorologique de Bambey.

II-6-3- Mesures agro-morphologiques

Elles ont été collectées à l'aide du descripteur de sorgho IBPGR (1993) et Audilakshmi *et al.* (2007). Elles ont été effectuées sur quatre (4) plants centraux choisis au hasard.

- ✓ **Nombre de feuilles** : Pour chaque parcelle élémentaire, quatre (4) plants ont été sélectionnés au hasard et leurs feuilles comptées toutes les deux semaines jusqu'à l'apparition de la feuille drapeau.
- ✓ **Hauteur de la plante** : Il s'agit de la hauteur sol-sommet de la panicule (HSS). Les mesures ont été faites à l'aide d'une règle en bois graduée de 400 cm de long sur quatre plants pris au hasard au niveau de chaque parcelle élémentaire.
- ✓ **Longueur panicule** : Elle a été réalisée lors de la maturité des plants à l'aide d'un ruban mètre sur quatre plants pris au hasard.
- ✓ **Diamètre de la panicule** : Il s'agit du diamètre pris sur la partie la plus large de la panicule avec le pied à coulisse.
- ✓ **Tallage** : Le comptage du nombre de talles a été fait sur quatre plants pris au hasard dans chaque parcelle élémentaire. Il est défini comme le nombre de tiges par plant, y compris la tige principale.
- ✓ **L'indice de surface foliaire (LAI)** : Le LAI est une grandeur sans dimension, qui exprime la surface foliaire d'une plante par unité de surface de sol. Il a été déterminé à l'aide du Sun scan (planche 3).
- ✓ **Poids panicule** : Il correspond au poids des panicules récoltées par parcelle obtenue grâce à une balance électronique de capacité 6000 g.

- ✓ **Poids grains par panicule** : C'est le poids des grains obtenus après battage des panicules séchées de chaque parcelle élémentaire.
- ✓ **Poids mille grains** : Il a été obtenu après comptage des grains, à l'aide d'un compteur électronique de type Numigral. Ce dernier est muni d'un système de détection de particules qui lui permet de compter un nombre exact de 1000 grains préalablement programmé. Ainsi, le poids est connu avec une balance électronique.
- ✓ **Biomasse sèche** : Il s'agit du poids sec de l'ensemble des tiges et feuilles des plants récoltés. Il a été mesuré après séchage.



Planche 3: Mesure de la surface foliaire à l'aide du Sun scan

II-6-4-Mesures physiologiques

La mesure de la teneur en chlorophylle s'est faite à l'aide du SPAD (SPAD-502 Plus, Konica-Minolta) qui est un appareil permettant de déterminer l'absorbance de chlorophylle dans le rouge (600 à 700 nm) et le proche infra-rouge (700 nm et plus). Elle a été effectuée sur la feuille drapeau et les deuxième et troisième feuilles supérieures de chaque plant pendant le stade épisaison et trente (30) jours après l'épisaison (Zhang *et al.*, 2019) (Planche 4). Elle permet d'estimer l'état physiologique des plants soumis à un stress hydrique ou thermique donc de sélectionner des cultivars ayant la capacité de rester vert malgré une fertilisation déficiente ou un manque d'eau dans le sol durant un stade donné de leur cycle de développement.



Planche 4: Mesure de la teneur en chlorophylle avec le SPAD-502 Plus

II-6-5-L'humidité du sol

Le niveau de stress du sol a été estimé à l'aide d'un Diviner 2000 (Sentek Pty Ltd, Adelaide, SA) (planche 5). Cet appareil est composé d'une sonde et d'un boîtier d'enregistrement des données. Il permet de mesurer les taux d'humidité du sol tous les 10 cm d'horizon de la surface du sol jusqu'à une profondeur de 160 cm sur des tubes implantés aléatoirement dans la parcelle (15 tubes pour l'essai STR et 9 tubes pour l'essai ETM ont été installés). L'état hydrique du sol a été déterminé par le calcul de la fraction d'eau transpirable du sol par la plante (FTSW) selon la formule ci-dessous :

$$FTSW = \frac{CHS - PF}{CC - PF}$$

CHs = cumul hydrique à la profondeur d'extraction racinaire de chaque tube pour une date,

PF= point de flétrissement permanent (le plus bas cumul enregistré sous environnement stressé),

CC= capacité au champ (le cumul hydrique le plus élevé).



Planche 5: Mesure de l'humidité du sol à l'aide d'un Diviner 2000

II-7-Variables calculées

1) **Rendement grains** =

$$Rdt = \frac{PGr}{(SU * NPR)} * 10$$

Rdt= rendement en grains ; **PGr**= poids grains ; **NPR**= nombre de poquets récoltés

SU : Surface utile de chaque poquet = 0,8 m x 0,2 m = 0,16 m²

2) **IR (Indice de Récolte)** =

$$IR = \frac{Rdtgrain}{(Biom)}$$

Rdt = rendement en grains ; **Biom**=Biomasse sèche

3)**Teneur en chlorophylle** : SFH et TSH ;

4)**Stay green**: ADVSF et RDVSF;

5)**Accumulation de chlorophylle** : CSF et TCS

Avec :

SFH : SPAD de la feuille étendard au stade de l'épiaison

TSH : SPAD total à l'épiaison des trois feuilles supérieures

ADVFSF : Différence absolue de la valeur du SPAD de la feuille étendard au stade de l'épiaison et trente jours après l'épiaison. **ADVFSF** = SFH-SPAD de la feuille étendard au stade de l'épiaison et trente jours après l'épiaison

RDVSF : Différence relative de SPAD de la feuille étendard à l'épiaison et trente jours après l'épiaison.
RDVSF = ADVFSF/SFH

CSF : SPAD cumulé de la feuille étendard (CSF = SPAD de la feuille étendard à l'épiaison + SPAD de la feuille étendard 30 jours après l'épiaison).

TCS : SPAD total cumulé des trois feuilles (TCS = SPAD total à l'épiaison + SPAD total 30 jours après l'épiaison)

6) L'indice de l'intensité du stress (Fischer & Maurer, 1978) :

$$SI = 1 - \left(\frac{RDTstr}{RDTetm} \right)$$

Avec RDTstr : rendement moyen en condition STR et RDTetm, celui en condition ETM. Elle nous permet d'avoir une idée générale sur le stress, plus le SI est proche de 1, plus le stress est sévère.

7) L'indice de sensibilité au stress (Fischer & Maurer, 1978) :

$$SSI = \frac{1 - (RDTstr/RDTetm)}{SI}$$

Avec RDTstr le rendement de chaque génotype en condition de stress hydrique, RDTetm celui du contrôle et *SI* l'intensité de stress. $SSI < 1$ alors le génotype est tolérant au stress, au cas contraire, il est sensible.

8) L'indice de tolérance au stress (Fernandez, 1992) :

$$STI = \frac{(RDTstr)(RDTetm)}{RDTm2}$$

Avec RDTstr le rendement du génotype x en condition de stress hydrique, RDTetm celui du contrôle et RDTm, le rendement moyen de l'essai contrôle. Plus le STI est élevé, plus tolérant et productif est le génotype.

9) La réponse au stress : c'est le gain relatif d'un génotype par rapport à sa performance en condition ETM. Plus sa valeur est grande, plus ce génotype a une bonne réponse pour la variable considérée. $Ri (\%) < 0$: Mauvaise réponse ;]0 ;25] : Réponse faible ;]25 ;50] :

Réponse moyenne ;]50 ;75] : Bonne réponse ;]75 ;100] : Très bonne réponse. Elle est obtenue par la formule suivante :

$$Ri(\%) = \frac{Xistr - Xietm}{Xistr} \times 100$$

; Ri étant la réponse du génotype x pour le trait i, Xietm, sa performance en ETM et Xistr, sa performance en STR.

10) Héritabilité au sens large (H²)

C'est la composante de la variation génétique totale qui est transmise à la génération suivante. Elle sert donc à quantifier la part des facteurs génétiques dans la constitution du phénotype d'une population et renseigne sur la possibilité d'améliorer un caractère par un programme d'amélioration variétale. Ses pourcentages ont été divisés en trois classes selon Robinson et al. (1949) : 0-30%=faible ; 30- 60%=moyenne et ≥60% élevée.

Pour l'ensemble des caractères étudiés, les paramètres génétiques ont été estimés à partir des composantes de l'analyse de variance. Les variances génotypique et phénotypique (σ^2g et σ^2p), les coefficients de variation génotypique et phénotypique (CVg et CVp), l'héritabilité au sens large (H²) ont été calculés selon les formules utilisées par Johnson *et al.* (1955) :

$$H^2 = \frac{\sigma^2g}{(\sigma^2g + \sigma^2gs/S + \sigma^2e/rS)}$$

Avec $\sigma^2g = (McG - McE) / r$

et

$\sigma^2p = \sigma^2g + \sigma^2gs/S + \sigma^2e/rS$

σ^2g = variance génotypique ;

σ^2p = variance phénotypique ;

McG=Moyenne carrée du génotype

McE=Moyenne carrée de l'erreur

r= Nombre de répétition

σ^2gs/S = variance de l'interaction génotype*essai

σ^2e = variance de l'environnement

S = nombre d'essais

- Coefficient de Variation Génotypique et Phénotypique (CVg/CVp) : sont obtenus en divisant la racine carrée des variances respectives par la valeur de la moyenne (X)

CVG= $(\sigma g/X) *100$

et

CVP (%) = $(\sigma p/X) *100$

-Gain génétique attendu (G. A) : le gain génétique est l'avantage (bénéfice) obtenu par la sélection artificielle pour un trait considéré. Il est estimé par la formule suivante :

$GA = K \times \sigma p \times H^2$ avec

K = 2,06 (K = constante = Intensité de sélection au seuil de 5%), σp : Ecart-type phénotypique

H² = Héritabilité au sens large

II-8-Collecte et traitement des données

La collecte de données a été réalisée à l'aide de l'application Field-lab version 2.9. Les données collectées ont été saisies et traitées à l'aide du tableur Excel 2016. Quant à l'analyse de la variance (ANOVA), les tests de significativité des coefficients de corrélations entre variables étudiées, les tests de comparaisons multiples (Tukey HSD) et les analyses multivariées (ACP), ils ont été effectués grâce au logiciel R version 4.2.1.

Chapitre III-RESULTATS ET DISCUSSION

III-1-REULTATS

III-1-1- Caractérisation du statut hydrique du sol

La figure 8 montre l'évolution du statut hydrique du sol en fonction des jours après semis pour chaque essai (ETM et STR). Les valeurs de la FTSW en environnement control ont connu une augmentation progressive au cours de l'expérimentation avant de connaître une baisse au 50^{ème} JAS. Concernant l'environnement stressé, la FTSW a connu une diminution importante allant de 0,84 à 0,13 depuis le 81^{ème} JAS correspondant à la date d'imposition du stress. Ceci montre que la teneur en eau du sol a varié d'un environnement à un autre et que les plants ont été stressés.

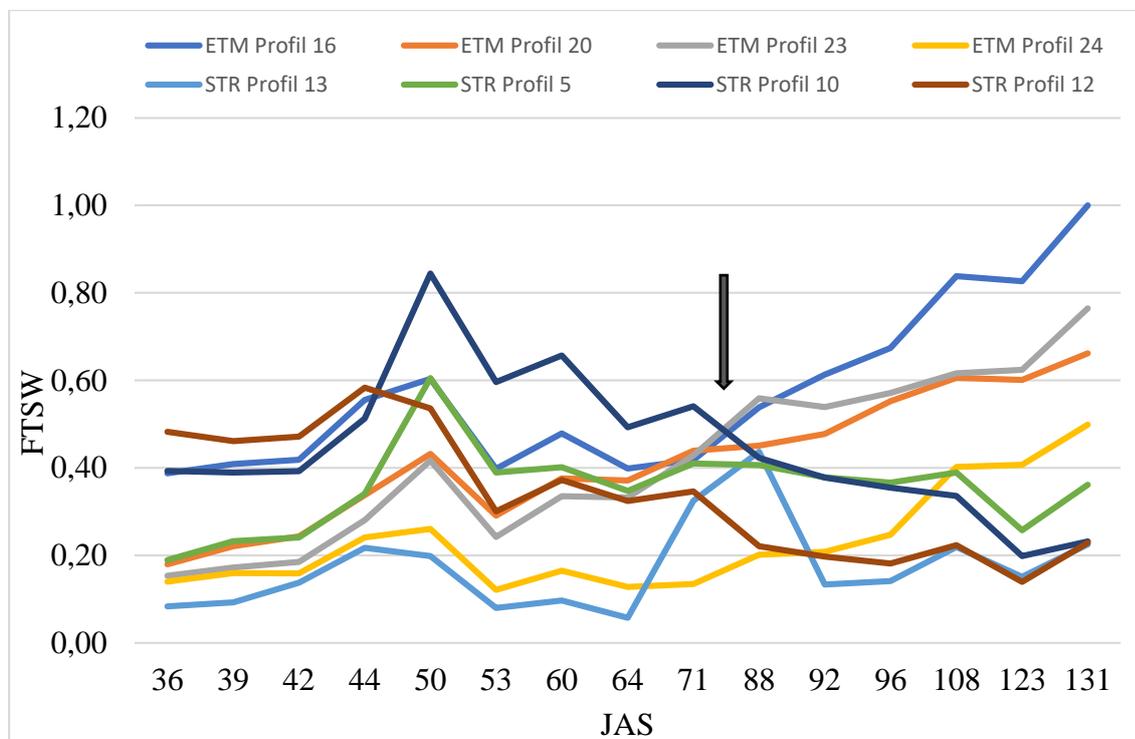


Figure 8: Evolution de l'humidité du sol en fonction des jours après semis

III-1-2- Analyses de variance

Les résultats de l'analyse de variance (ANOVA) présentés dans le tableau 1 ont mis en évidence un effet régime hautement significatif ($P. \text{value} \leq 0,001$) pour l'ensemble des variables étudiées. Cette même tendance est observée pour l'effet génotype. De même, l'analyse combinée (ETM+STR) confirme cet effet hautement significatif ($P. \text{value} \leq 0,001$) pour les facteurs Génotypes, Régime et l'interaction Génotype*Régime pour l'ensemble des variables étudiées excepté le nombre de talles (NbT) et l'indice de surface foliaire (LAI) vis-à-vis du facteur interaction. Ainsi, les variables qui ont des effets significatifs pourraient être intéressantes pour la caractérisation des lignées de la population stay green en conditions ETM et STR.

III-1-2-1- Variables agro-morphologiques

Il ressort de l'analyse descriptive (Tableau 1) que la durée semi-floraison a varié de 76 à 93 jours avec un coefficient de variation (CV) 8%. Ainsi, la moitié des génotypes a fleuri de 84 JAS pour ETM et de 85 JAS pour STR avec une hauteur sol-sommet (HSS) moyenne de 97 cm pour STR et 102 cm pour ETM. Le diamètre moyen et la longueur panicule moyenne ont été respectivement de 4,48 cm et 21,52 cm en environnement control et de 5,90 cm et 22,58 cm pour l'environnement STR. Cependant, Le PMG a oscillé de 14,03 g à 21,61 g avec un CV de 15%. Le rendement en biomasse a varié de 5536,58 g à 29189,74 g avec une moyenne de 16751,60 g. Le RdtG a varié de 1284,55 kg/ha à 2455,56 kg/ha pour les deux régimes avec un CV de 21%. En outre, une grande variabilité est révélée pour le rendement en grains avec en moyenne 1657,52 kg/ha en ETM et 1921,92 kg/ha en STR. De façon générale, il a été noté que toutes les variables agro morphologiques mesurées ont tendance à augmenter en STR à l'exception de la HSS, du RdtBiom et du PMG.

III-1-2-2- Variables physiologiques

En ce qui concerne les variables physiologiques (Tableau 1), les teneurs en chlorophylle (SFH et TSH) ont varié respectivement de 42,56 à 51,45 et de 131,80 à 156,64 avec des coefficients de variation de 7%. Le stay-green (ADVFSF) est de 4,39 en ETM et 11,50 en STR. Tandis que le RDVFSF est de 0,10 en ETM et 0,23 en STR. En revanche, l'accumulation de chlorophylle (CSF) oscille entre 67,40 à 99,87. La moyenne (TCS) est de 295,27 en ETM et 251,77 en STR. Il a été noté une diminution du stay-green, de la teneur et de l'accumulation en chlorophylle en STR comparé à ETM.

Tableau 1: Analyse de variance avec la significativité de la P-value associée à la moyenne d'essais et l'analyse descriptive des deux essais

	ETM					STR					ETM+STR					ANOVA		
	Moy	Max	Min	Ecartype	CV	Moy	Max	Min	Ecartype	CV	Moy	Max	Min	Ecartype	CV	G	R	GxR
DSF	84	90	78	7	9	85	89	81	8	10	84	93	76	7	8	***	***	***
NbT	3	4	2	1	23	3	3	2	1	22	3	4	2	0	17	***	***	-
HSS	102	114	90	18	18	97	105	90	20	20	100	118	83	18	18	***	***	***
NbF	17	18	16	1	9	18	19	17	2	8	17	19	16	1	7	***	***	***
Lpan	21,52	22,92	20,27	2,26	10,50	22,58	24,69	20,44	2,81	12,45	22,02	25,43	19,09	2,09	10	***	***	***
Dpan	4,48	5,02	3,96	1,02	22,85	5,90	6,84	4,97	1,91	32,31	5,15	7,03	3,70	1,12	22	***	***	***
PMG	19,07	20,57	17,57	3,60	18,85	16,89	18,85	14,89	3,07	18,18	18,17	21,61	14,03	2,75	15	***	***	***
RdtBiom	22761,83	29189,74	16423,65	6478,72	28,46	7199,64	8932,44	5536,58	3274,78	45,49	16751,60	29139,33	6073,89	5122,56	31	***	***	***
RdtG	1657,52	2096,97	1284,55	455,01	27,45	1921,92	2455,56	1434,34	666,94	34,70	1759,85	2731,39	1079,98	369,01	21	***	***	***
LAI	2,73	3,05	2,45	0,26	9,64	2,34	2,65	2,02	0,35	14,91	2,55	3,33	1,96	0,24	9	***	***	-
HI	0,09	0,13	0,06	0,04	49,13	0,33	0,44	0,23	0,19	57,40	0,18	0,43	0,06	0,09	48	***	***	***
SFH	47,44	48,98	45,93	3,85	8,11	47,05	49,81	44,25	4,54	9,66	47,24	51,45	42,56	3,27	7	***	***	***
TSH	144,83	147,73	142,15	10,23	7,06	144,43	153,03	135,49	16,31	11,29	144,70	156,64	131,80	10,26	7	***	***	***
ADV SF	4,39	6,01	2,83	2,89	65,79	11,50	15,75	7,11	5,55	48,22	7,88	16,02	2,19	3,13	40	***	***	***
RDV SF	0,10	0,13	0,06	0,07	70,42	0,23	0,30	0,15	0,09	41,26	0,16	0,31	0,05	0,06	36	***	***	***
CSF	97,40	99,40	95,46	5,82	5,97	82,44	89,11	76,31	10,20	12,37	89,99	99,87	67,40	7,04	8	***	***	***
TCS	295,27	299,12	291,68	16,08	5,45	251,77	273,09	232,55	31,67	12,58	273,22	301,77	301,77	21,06	8	***	***	***

- : non significatif ; *** : significatif au seuil de 0,001; DSF : Durée Semis Floraison, HSS : Hauteur Sol Sommet, DPAN : Diamètre Panicule, RdtBiom : rendement Biomasse, Lpan : longueur Panicule, PMG : Poids mille Grains, RdtG : Rendement grain, NbT : Nombre de talle, NbF : Nombre de feuille, LAI : Indice de surface foliaire, HI : Indice de récolte, SFH : SPAD de la feuille étendard au stade de l'épiaison, TSH : SPAD total à l'épiaison des trois feuilles supérieures, ADVSF : Différence absolue de la valeur du SPAD de la feuille étendard au stade de l'épiaison et trente jours après l'épiaison, RDV SF : Différence relative de SPAD de la feuille étendard à l'épiaison et trente jours après l'épiaison, CSF : SPAD cumulé de la feuille étendard, TCS : SPAD total cumulé des trois feuilles

III-1-3- Variabilité de la réponse au stress hydrique

La figure 9 représente le comportement des génotypes en fonction de leurs réponses au stress (Ri) par rapport au rendement grain (RdtG), au rendement biomasse (RdtBiom), au poids mille grains (PMG) et à l'indice de surface foliaire (LAI). Les génotypes qui ont une réponse au stress négative sont identifiés comme ayant une mauvaise réponse au stress. Ce qui revient à dire que le stress hydrique a réduit leurs performances. En revanche, toutes les lignées qui ont eu une réponse au stress positive ont empêché la chute de leurs performances en STR. Ainsi, 59 lignées ont eu des réponses au stress moyenne à bonne et 50 lignées ont faiblement répondu au stress hydrique pour le rendement en grain, soit 45,42%. Pour la variable Poids Mille Grains (PMG), 59 lignées ont répondu positivement au stress soit 24,58%, 13% pour l'indice de floraison et 1,2% pour la biomasse.

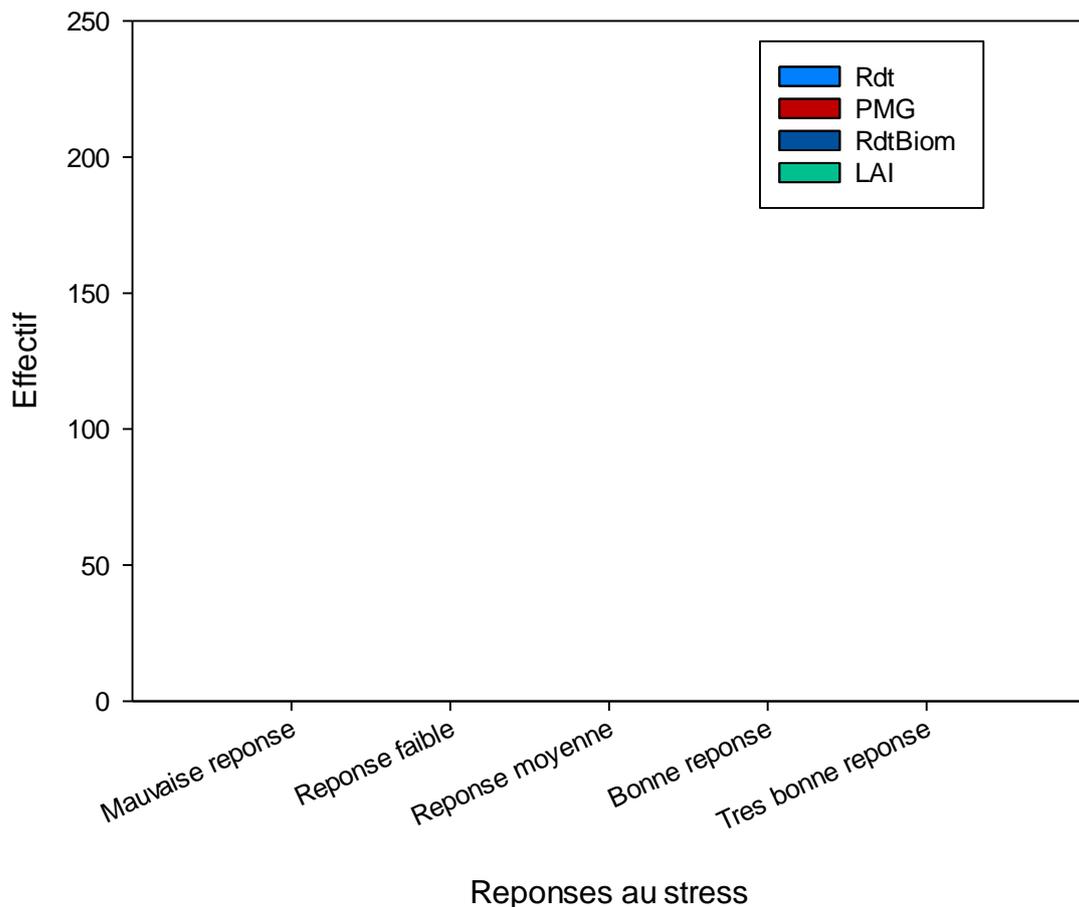


Figure 9: Comportement des lignées en fonction de leurs réponses au stress

III-1-4- Estimations des variabilités génétiques

Les estimations de variances génotypique, phénotypique et leurs coefficients de variation sont présentées dans le tableau 2. Il indique que la variance phénotypique est plus élevée que la variance génotypique pour tous les caractères analysés. Les valeurs génotypiques et phénotypiques les plus élevées ont été obtenues avec la durée semis-floraison (DSF), la hauteur sol-sommet (HSS), la longueur panicule (Lpan), le nombre de feuilles et la teneur en chlorophylle (SFH) avec de faibles coefficients de variations génotypique et phénotypique. Par contre, le nombre de talles (NbT), l'indice de récolte (HI), la biomasse (RdtBiom), et le rendement en grains (RdtG) présentent de faibles valeurs génotypiques et phénotypiques. Les variables physiologiques présentent aussi des valeurs génotypiques et phénotypiques élevées exceptés le ADVSRF, le RDVSF et le LAI. L'héritabilité au sens large calculée, montre une forte influence génotypique pour toutes les variables sauf le nombre de talles, le rendement et la biomasse, l'indice de récolte, l'indice de surface foliaire, le ADVSF et le RDVSF qui présentent des héritabilités faibles respectivement de 3,75%, 5,84%, 10,2%, 7,45 et 7,69%. D'où une faible influence de l'environnement sur l'expression phénotypique de ces variables et un contrôle génétique plus important sur leur expression. Les estimations d'héritabilité les plus élevées sont de 73,05% pour la hauteur de la plante (HSS), 53,92% pour le nombre de feuilles (NbF) et 53,73% pour la durée de semi-floraison (DSF). A noter aussi que tous les indices de stress hydrique (SSI, STI, Ri) ont eu une héritabilité moyenne respective de 48,18%, 48,2% et 42,21%.

Tableau 2: Source de variation de la réponse phénotypique au stress hydrique post-floral

Variables	Vg	Vp	CVg (%)	CVp (%)	H ² (%)	GA
DSF	63,39	118	6,2	7,59	53,72	1202,11
NbT	0,05	1,26	7,07	15,87	3,75	8,67
HSS	528,97	724,16	15,39	17,24	73,05	4049,53
NbF	2,36	4,37	5,53	7,24	53,92	232,20
Lpan	6,17	13,04	6,86	9,34	47,35	352,23
Dpan	1,6	4,04	11,21	21,27	39,62	164,05
PMG	7,77	20,54	8,87	13,54	37,83	353,19
RdtBiom	-	113191781	19,72	25,3	-	-
RdtG	36401,62	623451,3	0	19,38	5,84	9499,08
LAI	0,03	0,25	5,77	8,77	10,2	10,51
HI	-	0,04	0	41,2	-	-
SFH	15,18	30,08	4,25	6,72	50,45	569,99
TSH	128,72	327,96	3,43	6,83	39,25	1464,26
ADVSF	3,44	46,21	0	37,72	7,45	104,33
RDVSF	0	0,02	0	34,23	7,69	2,24
CSF	40,76	176,78	4,47	7,29	23,06	631,60
TCS	319,01	1600,9	3,9	7,07	19,93	1642,69
SSI	14,67	30,45	-165,88	-165,88	48,18	547,68
STI	0,33	0,68	36,65	36,65	48,2	81,88
Ri	3010,3	7131,45	-361,25	-361,25	42,21	7342,97

VG : Variance génotypique, VP : variance phénotypique, CVG : coefficient de variation génotypique, CVP : coefficient de variation phénotypique, H² : Héritabilité au sens large, GA : Gain génétique attendu, DSF : Durée Semis Floraison, HSS : Hauteur Sol Sommet, DPAN : Diamètre Panicule, RdtBiom : rendement Biomasse, Lpan : longueur Panicule, PMG : Poids mille Grains, RdtG : Rendement grain, NbT : Nombre de talle, NbF : Nombre de feuille, LAI : Indice de surface foliaire, HI : Indice de récolte, SFH : SPAD de la feuille étendard au stade de l'épiaison, TSH : SPAD total à l'épiaison des trois feuilles supérieures, ADVSF : Différence absolue de la valeur du SPAD de la feuille étendard au stade de l'épiaison et trente jours après l'épiaison, RDVSF : Différence relative de SPAD de la feuille étendard à l'épiaison et trente jours après l'épiaison, CSF : SPAD cumulé de la feuille étendard, TCS : SPAD total cumulé des trois feuilles, SSI : Indice de sensibilité au stress, STI : Indice de tolérance au stress, RI : Réponse au stress

III-1-5- Corrélation entre variables

III-1-5-1- Corrélation entre les variables agro-morphologiques et physiologiques

Le tableau 3 représente les corrélations bivariées de Pearson entre les variables physiologiques, celles de croissance et le rendement en grains et ses composantes. Ces corrélations sont plus représentatives en STR qu'en ETM. En effet, au régime hydrique ETM, la durée semis-floraison (DSF) est négativement corrélée avec le stay green contrairement au STR où le stay green est fortement et positivement lié à la durée semis-floraison. En essai control, seul des corrélations négatives ont été notées entre la HSS et la teneur en chlorophylle, la LPan et le stay green et la

DSF et l'accumulation de chlorophylle. En environnement stressé, le SFH et le CSF sont généralement corrélés aux composantes du rendement et aux variables de croissance même s'ils restent négatifs entre la DSF, le NbF, le RdtG, le HI avec le CSF. Cependant, le stay green est fortement et positivement corrélé au rendement en grain et NbF et est négativement corrélé au NbT, LAI, PMG et HI.

Tableau 3: Corrélations entre les variables agro-morphologiques et physiologiques

VARIABLES	ETM			STR		
	SFH	ADV SF	CSF	SFH	ADV SF	CSF
DSF	0,07	-0,13***	-0,09*	-0,08*	0,24****	-0,26****
NBT	0,01	0,02	0,02	-0,02	-0,16****	0,12**
HSS	-0,10**	0,00	-0,07	0,13***	-0,01	0,10*
LPAN	0,03	-0,08*	0,02	0,17****	0,05	0,10**
DPAN	0,07	-0,07	0,04	0,21****	-0,07	0,24****
NBF	0,02	-0,04	-0,04	0,01	0,17****	-0,11**
PMG	-0,07	-0,02	0,02	0,15**	-0,14**	0,26****
RDTBIOM	0,03	-0,02	0,01	0,11*	-0,07	0,15**
RDTG	-0,01	-0,02	-0,01	0,02	0,14**	-0,10*
LAI	-0,06	-0,02	-0,05	0,06	-0,09*	0,12**
HI	0,02	-0,03	0,01	-0,04	0,12*	-0,11*
SFH	1,00	-0,49****	0,82****	1,00	0,41****	0,78****
ADV SF	-0,49****	1,00	-0,15****	0,41****	1,00	-0,47****
CSF	0,82****	-0,15****	1,00	0,78****	-0,47****	1,00

***: La corrélation est significative au seuil de 0,1 ; **: La corrélation est significative au seuil de 0,01 ; * : La corrélation est significative au seuil de 0,05 ; DSF= durée semi-floraison ; NbT= nombre de talle ; Lpan= longueur panicule ; Dpan= diamètre panicule ; HSS= Hauteur sol-sommet ; PMG= poids mille grains ; RdtBiom=rendement Biomasse ; RdtG= rendement ; SFH=stay-green ; ADV SF= teneur en chlorophylle ; CSF= accumulation de chlorophylle ; LAI= indice de surface foliaire ; Hi= indice de récolte

III-1-5-2-Corrélations entre les variables agro-morphologiques, physiologiques et les indices de stress

Les relations existant entre les variables étudiées et les indices de stress sont représentés dans le tableau 4. La durée semis-floraison est négativement corrélée à l'indice de sensibilité au stress (SSI) et est positivement et fortement liée à l'indice de tolérance (STI) et à la réponse au stress (Ri). Les composantes du rendement ont des corrélations positive avec le SSI et négative avec le STI et Ri. En ce qui concerne les variables physiologiques, une forte corrélation est notée entre le stay-green avec le STI et le Ri.

Tableau 4: Corrélations entre les variables de croissance, physiologique, les composantes du rendement et les indices de stress.

VARIABLES	SSI	STI	RI
DSF	-0,19****	0,19****	0,17***
NBT	0,13**	-0,13**	-0,14**
HSS	0,00	0,00	0,00
LPAN	-0,08	0,08	0,11*
DPAN	-0,08	0,08	0,08
NBF	-0,18****	0,18****	0,15****
PMG	-0,02	0,02	0,10*
RDTBIOM	-0,23****	0,23****	0,19****
RDTG	-0,83****	0,83****	0,67****
LAI	0,03	-0,03	0,01
HI	-0,36****	0,35****	0,29****
SFH	0,00	0,00	0,01
ADVFSF	-0,13**	0,13**	0,09*
CSF	0,12**	-0,12**	-0,06

***: La corrélation est significative au seuil de 0,01 ; * : La corrélation est significative au seuil de 0,05, SSI=indice de sensibilité au stress ; STI= indice de tolérance, Ri= réponse au stress ; HSS= Hauteur sol-sommet ; PMG= poids mille grains ; RdtBiom=rendement Biomasse ; RdtG= rendement ; SFH=stay-green ; ADVFSF= teneur en chlorophylle ; CSF= accumulation de chlorophylle

III-1-6 Analyse en composante principale (ACP)

L'analyse en composante principale a concerné les variables significatives pour l'interaction génotypes et régime et tenant en compte le niveau de corrélation qui existe entre les variables. Il s'agit des variables telles que : le rendement en grains (RdtG), la biomasse aérienne (RdtBiom), la durée semi-floraison (DSF), l'indice de récolte (HI), l'indice de surface foliaire (LAI), le stay green (ADVFSF), l'indice de sensibilité au stress (SSI) et l'indice de tolérance au stress (STI) (figure 13).

III-1-6-1 Caractéristiques des axes factoriels

A travers l'analyse en composante principale (ACP) réalisée, la figure 10 montre la répartition des variables étudiées. Les trois premiers axes totalisent 67,73% de la variabilité étudiée et les deux premiers 53,02%. L'axe 1 absorbe 31,52% de l'inertie et est porté par l'indice de sensibilité au stress (SSI), l'indice de tolérance au stress (STI) et la durée semis floraison (DSF) qui contribuent respectivement 28,49%, 28,48% et 14,59% à sa formation (figure 11). L'axe 2 explique 21,5% de l'inertie et est formé par l'indice de récolte (HI), la biomasse aérienne (RdtBiom) et l'indice de surface foliaire (LAI) contribuant de façon respective 38,35%, 26,92% et 9,64% à sa formation (Figure 11). Le stay green (ADVFSF) et le rendement en grains (RdtG) contribuent plus à la formation de l'axe 3.

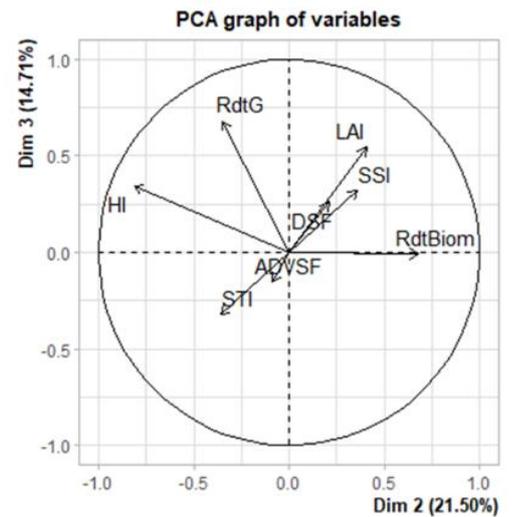
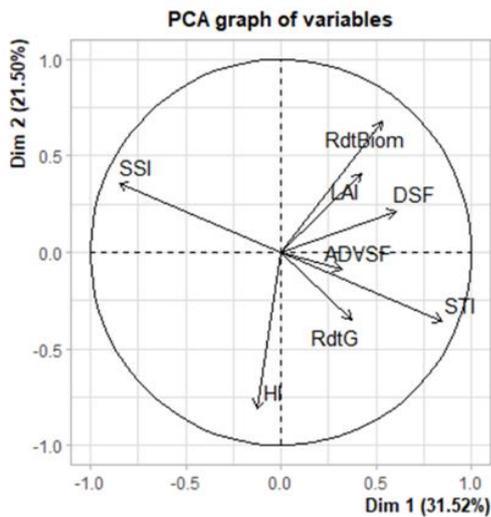


Figure 10: Cercle de corrélation des plans 1-2, 2-3

	Dim.1	Dim.2
DSF	14.59	2.66
RdtG	5.46	7.04
SSI	28.49	7.47
STI	28.48	7.48
RdtBiom	11.18	26.91
HI	0.62	38.35
LAI	7.12	9.64
ADVFSF	4.08	0.44

Figure 11: Contribution des variables sur la formation des axes

III-1-6-2- Caractéristiques des génotypes

La classification ascendante hiérarchique (CAH) (Figure 12) réalisée avec les données combinées des deux essais, permet de constater que quatre tendances se dégagent au sein de cette population, grâce à leurs similitudes de performances en termes de productivité et tolérance au stress (Figure 13).

Groupe 1 en rouge : Il est composé de 77 génotypes dont le témoin T4, Ces lignées se distinguent des autres par leur forte sensibilité au déficit hydrique post-floral (SSI=1,4 ; STI=0,84) et leur faible productivité (RdtG= 1464,73 kg/ha) (Figure 14).

Groupe 2 coloré en vert : Ce groupe est composé de 64 génotypes dont le témoin T5 qui partagent de forte valeur de l'indice de récolte ($HI=0,24$) présentant des performances moyennes en rendement en grains ($RdtG=1725,90$ kg/ha) et faiblement sensible au stress hydrique post-floral et tolérant au stress hydrique ($STI=1,51$).

Groupe 3 coloré en bleu : Il est constitué de 53 lignées dont les témoins T1, T2, T3 et T6, Ces lignées présentent les meilleures performances avec un haut potentiel de production ($RdtG=2137,28$ kg/ha), Elles sont moyennement tolérantes ($SSI=-0,28$) et moyennement productives en condition de stress hydrique ($STI=1,04$).

Groupe 4 en mauve : Il est constitué de 47 lignées, Il est caractérisé par le meilleur indice de tolérance au stress ($STI=1,99$), Ces lignées sont très tolérantes ($SSI=-6,61$) et très productives en condition de stress hydrique post-floral ($RdtG=1863,22$ kg/ha).

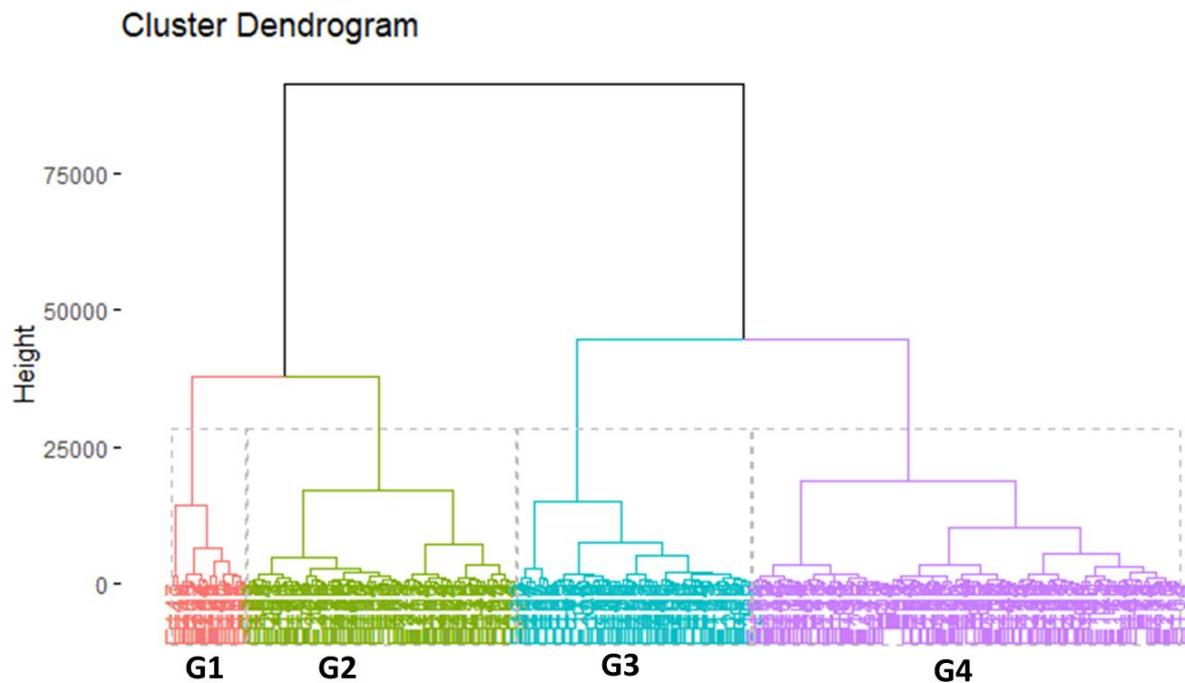


Figure 12: Dendrogramme des données combinées des deux conditions hydriques (ETM+STR)

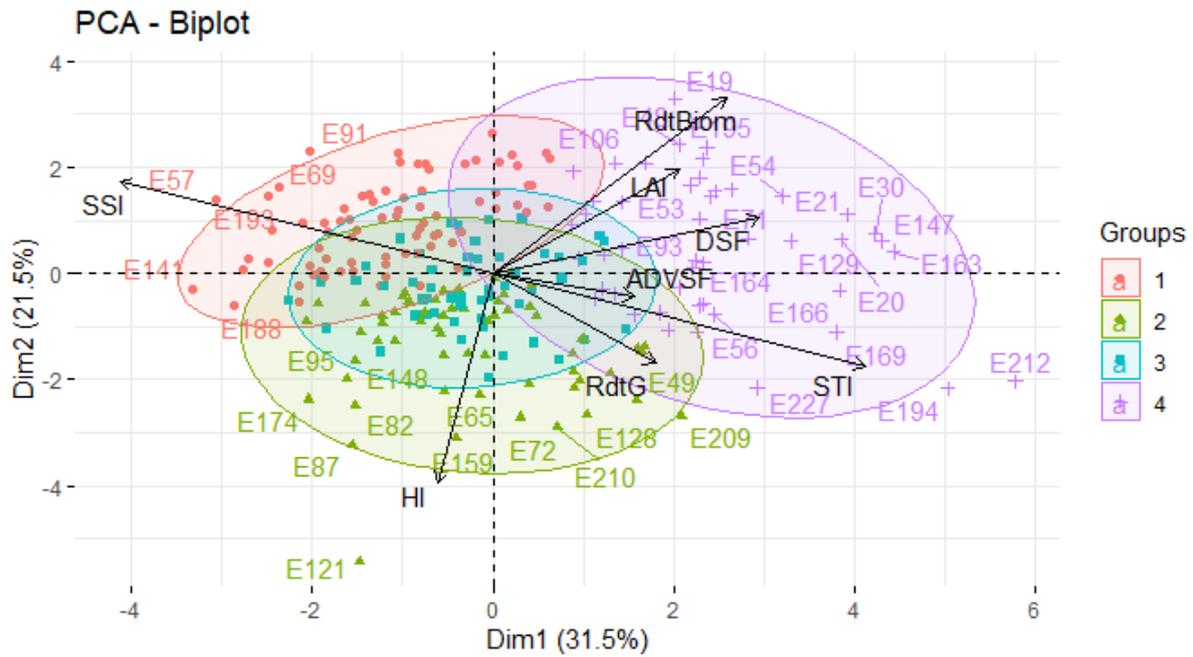


Figure 13: Répartition des géotypes selon leur potentiel de tolérance au stress hydrique post-floral

III-1-7- Identification des meilleures lignées

La figure 14 représente les 47 lignées de la population stay green les plus adaptées au stress hydrique post-floral. Ces lignées ont été classées selon leur indice de tolérance au stress (STI) variant de 1,5 à 4,13. Les 10 géotypes les plus tolérants de la population sont : E212 qui est le plus tolérant avec un STI de 4,13 suivis de E194, E147, E163, E169, E166, E20, E198, E227 et E30. Ces géotypes ont de fortes performances en rendement en grains et en biomasse, Ils ont aussi des valeurs ADVSF élevées. Ils se révèlent plus adaptés que le témoin de référence international (B35). D'une manière globale, ces lignées présentent une meilleure croissance végétative ainsi qu'une meilleure production en condition stressée.

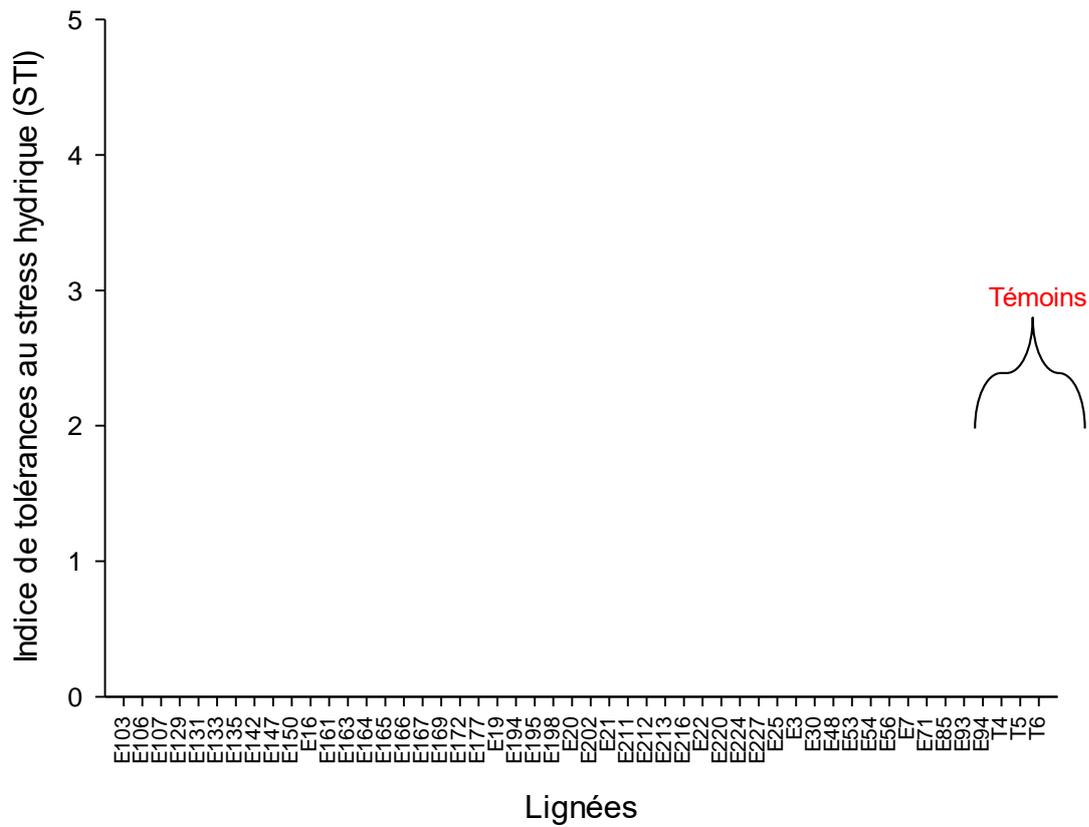


Figure 14: Variation de l'indice de tolérance en fonction des lignées les mieux adaptées au stress hydrique post-floral

III-2- Discussion

En suivant les données du profil hydrique du sol, les valeurs de la FTSW (fraction d'eau transpirable du sol par la plante) ont montré que le niveau de stress hydrique du sol a atteint des valeurs critiques de la fraction d'eau transpirable du sol par la plante (FTSW = 0,13 au 81^{ème} JAS en condition hydrique STR). Ce qui montre que les plants ont subi un stress hydrique post-floral. En effet, Gholipour *et al*, (2012) montrent que le sorgho est stressé à des teneurs en eau du sol comprises entre 0,32 et 0,48.

L'analyse de la variance a montré un effet régime et génotype significatif pour toutes les variables étudiées. En effet, la significativité de l'interaction Génotype × Environnement montre que les génotypes se comportent différemment d'un régime à un autre. Ce qui atteste que cette population a une large diversité phénotypique, agro-morphologique et physiologique. Cela peut être dû à une forte variabilité génétique de la population stay green qui est constituée de lignées provenant de croisements avec des parents différents (Nganda × B35 ; Golobé × B35 et Darou × B35). La variation notée se rapproche de celle donnée par Sene, (2019) qui révèle une large gamme de variation au sein de la population MAGIC. De plus les écarts importants entre les minimas et les maximas des différents paramètres étudiés confirment aussi cette variabilité. En effet, une augmentation a été notée pour l'ensemble des variables étudiées à l'exception de la hauteur (HSS), de la biomasse (RdtBiom), du poids mille grains (PMG), le stay green, la teneur et l'accumulation en chlorophylle qui ont connu une baisse de 18% (HSS), 31% (RdtBiom), 15% (PMG), 7% (SFH) et 8% (CSF) en STR par rapport à l'environnement control. En effet, cette augmentation pourrait être expliquée par le fait que ces génotypes ont la capacité à empêcher la baisse de leurs performances sous déficit hydrique post-floral. Ces résultats sont en phase avec ceux de Sine (2009) ; Sene (2019) ; Bodian (2020) et Senghor (2021) qui ont eu des réductions de ces variables en condition de déficit hydrique. Cette conformité pourrait être due par le fait que la population stay green est constituée de lignées issues de parents qui ont de forts potentiels productifs et une bonne capacité à tolérer le déficit hydrique. Ce qui leur procure une bonne productivité et une bonne tolérance au stress hydrique post-floral.

En outre, la perte en biomasse est due à la sénescence des feuilles et tiges. En effet, Asseng et Van Herwaarden (2003) et Plaut *et al*, (2004) affirment qu'en condition de déficit hydrique, on note une baisse de la conductance stomatique réduisant la quantité d'eau que les plants utilisent. Cependant, une diminution des assimilats carbonés pour le remplissage des grains est aussi remarquée favorisant la baisse de PMG. Ainsi, une incapacité des plants à absorber de façon

approprié les nutriments du sol en raison de l'humidité limitée en condition de déficit hydrique provoque un épuisement des photosynthétats des feuilles, surtout l'azote. Ce qui serait à l'origine de la baisse de la teneur en chlorophylle. En revanche, la baisse de la hauteur pourrait être due à une mauvaise exsertion de la panicule en STR. Ces résultats sont en concordance avec ceux de Sine (2009) , Akata (2017) et Senghor (2021). Ces derniers ont trouvé les mêmes résultats dans les études sur la tolérance au stress hydrique pré et post floral du sorgho.

La corrélation positive entre la teneur en chlorophylle et la biomasse en STR montre que la biomasse aérienne est fonction de la teneur en chlorophylle. En effet, une augmentation de la teneur en chlorophylle entraîne une hausse de la biomasse. Cependant, une forte corrélation est notée entre la teneur en chlorophylle et le stay-green. En effet, le stay-green est une condition préalable à la dégradation de la chlorophylle du fait qu'il mesure la concentration en chlorophylle. Selon Ramírez *et al.*, (2014), le stay-green modifie la dégradation de la chlorophylle. Ces résultats sont en concordance avec ceux de Amelework *et al.*, (2015) qui affirment que le stay-green est associé à un niveau plus élevé de teneur en chlorophylle.

Le stay-green est fortement lié à l'indice de tolérance au stress (STI), à la réponse au stress et au rendement en grains et ses composantes qui sont négativement corrélés à l'indice de sensibilité au stress (SSI). Cela montre que les lignées adaptées au stress hydrique post-floral ont une bonne expression des variables liées au rendement et à ses composantes. Ce qui corrobore les résultats de Barnabás *et al.*, (2008) selon qui les lignées ayant une bonne expression du rendement et ses composantes peuvent être considérées comme tolérantes à ce type de stress.

Par ailleurs, la faible valeur d'héritabilité obtenue pour le rendement en grains (RdtG : $H^2=5,84\%$) montre que cette variable ne peut pas être utilisée comme descripteur pour l'identification de sources de tolérance au déficit hydrique post-floral. En revanche, de fortes héritabilités ont été obtenues pour l'indice de tolérance et de sensibilité au stress (STI : $H^2=48,2\%$; SSI : $H^2=48,18\%$). Dès lors, puisque ce caractère est positivement corrélé au rendement, une sélection indirecte pourrait aider à améliorer ce trait. Sur l'ensemble des lignées, 45,8% ont répondu positivement au stress pour le rendement, 24,58% pour le poids mille grains, 13% pour l'indice de surface foliaire et 1,2% pour la biomasse. Ces résultats sont en synergie avec ceux de Sene (2019) qui précise que la biomasse de même que le poids mille grains sont très affectés par le déficit hydrique de fin de cycle.

L'analyse en composante principale a montré une forte variabilité de réponse au stress hydrique de fin de cycle des lignées. Ce qui a permis de les classer par groupes selon leurs similitudes de réponses en condition de déficit hydrique post-floral. Selon Fernandez *et al*, (1992), le STI renseigne à la fois sur la tolérance et la productivité d'un génotype donnée. En outre, Bretaudeau *et al*, (1994) affirment que la tolérance d'un génotype est sa capacité à empêcher la chute de son rendement sous stress hydrique. En revanche, le témoin B35 qui est connu pour sa forte tolérance au stress hydrique se révèle moins tolérant que ces génotypes. Ce qui montre que notre matériel végétal est moins sensible au déficit hydrique post-floral que le témoin B35. Ces résultats corroborent ceux de Senghor (2021) qui a pu identifier un matériel végétal moins sensible au déficit hydrique post-floral que le B35.

Par conséquent, les lignées du groupe 4, identifiées grâce à l'analyse multivariée et caractérisées par une bonne productivité et une bonne tolérance au stress hydrique pourraient être utilisées dans les programmes plus approfondies d'amélioration variétale de sorgho du Sénégal pour l'adaptation à la sécheresse face aux aléas des changements climatiques.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Ce travail a été entrepris dans le but d'identifier les génotypes les plus tolérants à la sécheresse et d'évaluer leur performance. Il a montré que la population stay-green regorge d'une grande variabilité de réponses en condition de stress hydrique post-floral. En effet, cette étude montre que les génotypes se comportent différemment d'un environnement à un autre et cela est plus sous contrôle génétique. Ainsi une importante réduction de la biomasse aérienne, de la teneur relative en chlorophylle et du poids mille grains a été notée.

Les corrélations ont montré que la teneur en chlorophylle est fortement liée à la biomasse et au poids mille grains. Toutefois de fortes corrélations ont été notées entre la teneur en chlorophylle (SFH), le stay-green (ADVSF) et l'indice de tolérance au stress (STI). Ces derniers sont aussi corrélés au rendement. Ce qui permet de dire que ces variables sont liées au stress hydrique post-floral.

La classification hiérarchique ascendante a permis d'identifier 47 lignées qui ont de fortes performances en condition de déficit hydrique post-floral. Parmi elles, 10 lignées s'expriment le mieux (E212, E194, E147, E163, E169, E166, E20, E198, E227 et E30).

En perspective, il serait intéressant de reproduire l'essai en condition de stress hydrique pré-floral. Il serait aussi important de tester les meilleures lignées obtenues aussi bien en condition de stress hydrique pré comme post-floral. Ce qui permettrait en définitive de trouver des génotypes locaux de sorgho adaptés aussi bien au stress hydrique pré comme post-floral.

Il serait également intéressant, de reconduire l'essai en milieu paysan et de mettre en place une sélection variétale participative pour permettre aux producteurs de choisir les variétés qui répondent à leur besoin.

Références bibliographiques

- Ahmad Z., Anjum S., Waraich E.A., Ayub M.A., Ahmad T., Tariq R.M.S., Ahmad R., Iqbal M.A. (2018) growth, physiology, and biochemical activities of plant responses with foliar potassium application under drought stress, *Journal of Plant Nutrition*, 41,1734-1743.
- Ahmadou L.Y. (2014) – l’impact du changement climatique sur la sécurité alimentaire au Sénégal, 48 pages.
- Akata E. (2017) – Caractérisation de la réponse au déficit hydrique d’un panel ouest africain de sorgho : identification des sources de tolérance. Thèse de doctorat en biotechnologie végétale et microbienne et amélioration des plantes, UCAD, Dakar, Sénégal, 106p.
- Almodares A., Hadi M.R. (2009) – Production of bioethanol from sweet sorghum: African Journal of Agricultural Research, Vol. 4 (9), pp. 772 - 780.
- Amelework B., Shimelis H., Tongoona P., Laing M. (2015) – Physiological mechanisms of drought tolerance in sorghum, genetic basis and breeding methods: *African Journal of Agricultural Research*, **10**, 3029–3040.
- ANSD (2023) – Bulletin Mensuel des statistiques économiques et financières de février 2023,110pages.
- Antonopoulou G., Gavala H.N., Skiadas I.V., Angelopoulos K., Lyberatos G. (2008) – Biofuels generation from sweet sorghum: fermentative hydrogen production and anaerobic digestion of the remaining biomass, *Bioresource technology*, **99**, 110–119.
- Asseng S., Van Herwaarden A.F. (2003) – Analysis of the benefits to wheat yield from assimilates stored prior to grain filling in a range of environments *, *Plant and Soil*, **256**, 217–229.
- Audilakshmi S., Aruna C., Solunke R.B., Kamatar M.Y., Kandalkar H.G., Gaikwad P., Murthy K.G., Jayaraj K., Ratnavathi C.V., Kannababu N. (2007) – Approaches to grain quality improvement in rainy season sorghum in India, *Crop Protection*, **26**, 630–641.
- Barnabás B., Jäger K., Fehér A. (2008) – The effect of drought and heat stress on reproductive processes in cereals, *Plant, Cell & Environment*, **31**, 11–38.

- Bodian S. (2020) – Evaluation agro-morphologique et physiologique de la réponse au déficit hydrique pré-floral de la collection nationale de sorgho [*Sorghum bicolor* (L.) Moench, Poaceae] du Sénégal, In : mémoire de master en biotechnologies végétales et microbiennes, Ucad, Senegal. P, 65,
- Borrell A.K., Mullet J.E., George-Jaeggli B., van Oosterom E.J., Hammer G.L., Klein P.E., Jordan D.R. (2014) – Drought adaptation of stay-green sorghum is associated with canopy development, leaf anatomy, root growth, and water uptake, *Journal of experimental botany*, **65**, 6251–6263.
- Bretaudeau A., Traore B.M., Traore S., Toure O.S., Keita M, (1994) – Contribution à l'utilisation des paramètres morpho-physiologiques et agronomiques pour la sélection de variétés de sorgho résistantes à la sécheresse," *Bilan hydrique agricole et sécheresse en Afrique Tropicale* », (John Libbey Ed,) Eurotext, Paris, 125–136.
- Chantereau J., Cruz J. -F., Ratnadass A., Trouche G. (2013) – *Le sorgho*, Agricultures tropicales en poche, Quæ, CTA., Versailles Cedex, France, 267p.
- Chantereau J., Nicou R. (1991) – Sorghum, *Sorghum*, Paris, Maisonneuve et Larose, collection le technicien de l'agriculture tropicale, 159p.
- Chennafi H., Aïdaoui A., Bouzerzour H., Saci A. (2006) – Yield response of durum wheat (*Triticum durum* Desf.) cultivar Waha to deficit irrigation under semi arid growth conditions, *Asian Journal of Plant Sciences* Vol 5, n° 5, 854-860.
- Cissé N. (2001) – La culture de sorgho au Sénégal, *La culture du sorgho de décrue en Afrique de l'Ouest et du Centre : Situation actuelle et définition dun Plan dAction Régional*, AECI, FAO, 111–121.
- Dakouo D., Trouche G., Malick N.B., Neya A., Kaboré K.B. (2005) – Lutte génétique contre la cécidomyie du sorgho, *Stenodiplosis sorghicola* : une contrainte majeure à la production du sorgho au Burkina Faso, *Cahiers agricultures*, **14**, 201–20.

- Deu M., Rattunde F., Chantreau J. (2006) – A global view of genetic diversity in cultivated sorghums using a core collection, *Genome*, **49**, 168–180.
- Diatta C., Tovignan T.K., Adoukonou-Sagbadja H., Aidara O., Diao Y., Sarr M.P., Ifie B.E., Offei S.K., Danquah E.Y., Cisse N. (2019) – Development of sorghum hybrids for stable yield and resistance to grain mold for the Center and South-East of Senegal, *Crop Protection*, **119**, 197–207.
- Doggett H. (1988) – Sorghum, Tropical agricultural series, *Longman Scientific, Essex Dong J, Teng W, Buchholz WG, Hall TC (1996) Agrobacterium-mediated transformation of Javanica rice, Mol Breed*, **2**, 167–276.
- Fall R., Cisse M., Sarr F., Kane A., Diatta C., Diouf M. (2016) – Production and use Sorghum: a literature review, *J Nutr Health Food Sci*, **4**, 1–4.
- Faye A., Ndiaye M., Ndiaye A. (2018) – L’impact des changements climatiques sur les rendements des principales cultures céréalières au Sénégal, *Revue Internationale des Economistes de Langue Française : revue de l’Association Internationale de Economistes de Langue Française avec la collaboration Université des Sciences Economiques et de Gestion*, **3**, 291–306.
- Fernandez G.C. (1992) – Effective selection criteria for assessing plant stress tolerance, in: *Proceeding of the International Symposium on Adaptation of Vegetables and other Food Crops in Temperature and Water Stress, Aug, 13-16, Shanhua, Taiwan, 1992*, pp, 257–270.
- Fischer R.A., Maurer R. (1978) – Drought resistance in spring wheat cultivars, I, Grain yield responses, *Australian Journal of Agricultural Research*, **29**, 897–912.
- Fracasso A., Trindade L.M., Amaducci S. (2016) – Drought stress tolerance strategies revealed by RNA-Seq in two sorghum genotypes with contrasting WUE, *BMC Plant Biology*, **16**, 1–18.

- Garcia L. (2015) – Impact du changement climatique sur les rendements du mil et de l’arachide au Sénégal : Approche par expérimentation virtuelle, PhD Thesis Thesis, Montpellier Sup Agro, 69p.
- Gaufichon L., Prioul J.-L., Bachelier B. (2010) – Quelles sont les perspectives d’amélioration génétique de plantes cultivées tolérantes à la sécheresse, *Rapport FARM*, 61 pages.
- Gholipoor M., Sinclair T.R., Prasad P.V.V. (2012) – Genotypic variation within sorghum for transpiration response to drying soil, *Plant and Soil*, **357**, 35–40.
- Granes D. (1995) – + réponse de la variété de sorgho ce l45--66 a l’alimentation en, eau : effets du stress hydrique sur~leixendement et la qualité des semences “ : ”
- Harlan J.R., de Wet J.M. (1972) – A simplified classification of cultivated sorghum 1, *Crop science*, **12**, 172–176.
- Hoffmann G., Marnotte P., Dembélé D. (1997) – Emploi d’herbicides pour lutter contre *Striga hermontica*, 5p.
- House L.R. (1987) – Manuel pour la sélection du sorgho (2ème édit.), *ICRISAT-Patancheru*, 229p.
- Hud A.A., Abuali A.I., Elnahsikh M.H., Ahmed M.I., Idris A.E., Farah A.M., Ali H.A., Mohamed B.B., Babiker A.E., Mohamed E.A. (2016) – Effect of water stress on vegetative growth, yield and yield components of sweet sorghum (*Sorghum bicolor* L.) genotypes, *Environ, Nat, Resour, Int, J*, **7755**, 33–38.
- IBPGR I. (1993) – Descriptors for sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench], *International Board for Plant Genetic Resources, Rome, Italy*, 432.
- Johnson H.W., Robinson H.F., Comstock R.E. (1955) – Estimates of Genetic and Environmental Variability in Soybeans ¹, *Agronomy Journal*, **47**, 314–318.

- Josephine D., Mberdoum Memti N., Sokoye F.G. (2020) – Impact du stress hydrique sur la production d’une variété de sorgho (*Sorghum bicolor* [L], le S35 au Tchad, *Journal of Animal & Plant Sciences*, **45**, 7870–7883.
- Kante M. (2011) – Niveaux de résistance à *Striga hermonthica* (Del.) Benth, de 15x2 variétés de sorgho (*Sorghum bicolor* [L.] Moench),., 69p.
- Laberche J.C. (2004) – Biologie végétale, 2004, *Edition Dunod, France*.
- Ladoui K.K., Mefti M., Benkherbache N. (2020) – Selection de genotypes d’orge (*Hordeum vulgare* L.) tolérants au stress hydrique par les indices de tolérance a la secheresse, *Revue Agrobiologia* (2020), **10**, 1805–1812.
- Liu G., Gilding E.K., Kerr E.D., Schulz B.L., Tabet B., Hamaker B.R., Godwin I.D. (2019) – Increasing protein content and digestibility in sorghum grain with a synthetic biology approach, *Journal of Cereal Science*, **85**, 27–34.
- Mauboussin J.-C., Gueye J., N’Diaye M. (1977) – L’amélioration du sorgho au Sénégal, *Agronomie Tropicale*, **32**, 303–310.
- May H., Milthorpe F.L. (1962) – Drought resistance of crop plants, In: *Field Crop Abstr*, pp, 171–179.
- Melle P.P., MOUELLEF A. (2010) – Caractères physiologiques et biochimiques de tolérance du blé dur (*Triticum durum* Desf.) au stress hydrique., 118p.
- Mohammed M.S., Ahmed E.A., Madani A.E.K. (2018) – Osmotic Adjustment in Cultivars of C3 (Groundnuts, *Arachis hypogaea*) and C4 (Sorghum, *Sorghum bicolor* L. Moench) Species in Response to Water Stress, *Sudan Journal of Desertification Research*, **10p**.
- Ndiaye T.M.N., Diatta J.N.E. (2021) – Disponibilité céréalière et contraintes à la production dans le Département d’Oussouye, Sénégal, *Afrique SCIENCE*, **18**, 107–116.

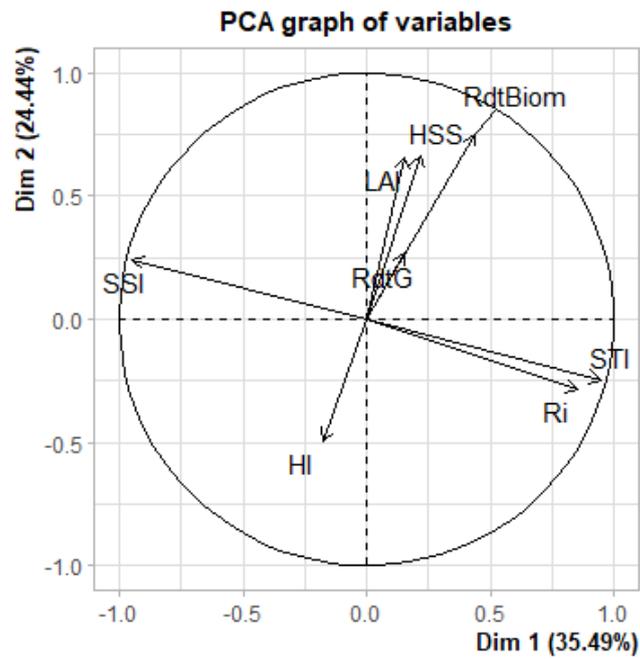
- Perrier L. (2017) – Analyse et modélisation de la variabilité phénotypique du sorgho biomasse pour l’exploration d’idéotypes dans un contexte de diversification des usages, PhD Thesis, Montpellier SupAgro, 187p.
- Plaut Z., Butow B.J., Blumenthal C.S., Wrigley C.W. (2004) – Transport of dry matter into developing wheat kernels and its contribution to grain yield under post-anthesis water deficit and elevated temperature, *Field Crops Research*, **86**, 185–198.
- Ramírez D.A., Yactayo W., Gutiérrez R., Mares V., De Mendiburu F., Posadas A., Quiroz R. (2014) – Chlorophyll concentration in leaves is an indicator of potato tuber yield in water-shortage conditions, *Scientia Horticulturae*, **168**, 202–209.
- Sanchez A.C., Subudhi P.K., Rosenow D.T., Nguyen H.T. (2002) – [No title found], *Plant Molecular Biology*, **48**, 713–726.
- Sene J.P. (2019) – Evaluation agro-morphologique et physiologique d’une population MAGIC de sorgho [*Sorghum bicolor* (L) Moench] en condition de stress hydrique post-floral dans la station expérimentale de Bambey, 66p.
- Senghor R.D. (2021) – Evaluation agro-morphologique et physiologique de la réponse au déficit hydrique post-floral de la collection de sorgho [*Sorghum bicolor* (L.) Moench, Poaceae] du Sénégal, In : *Mémoire de Master en Biotechnologies Végétales et Microbiennes*, p, 61, UCAD.
- Shah M. M., Fischer G., van Velthuisen H. (2008), Food security and sustainable agriculture, The challenges of climate change in Sub-Saharan African, New York: Commission on Sustainable Development.
- 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, in : p, 192.
- Vadez V., Deshpande S.P., Kholova J., Hammer G.L., Borrell A.K., Talwar H.S., Hash C.T. (2011) – Stay-green quantitative trait loci’s effects on water extraction, transpiration

efficiency and seed yield depend on recipient parent background, *Functional Plant Biology*, **38**, 553–566.

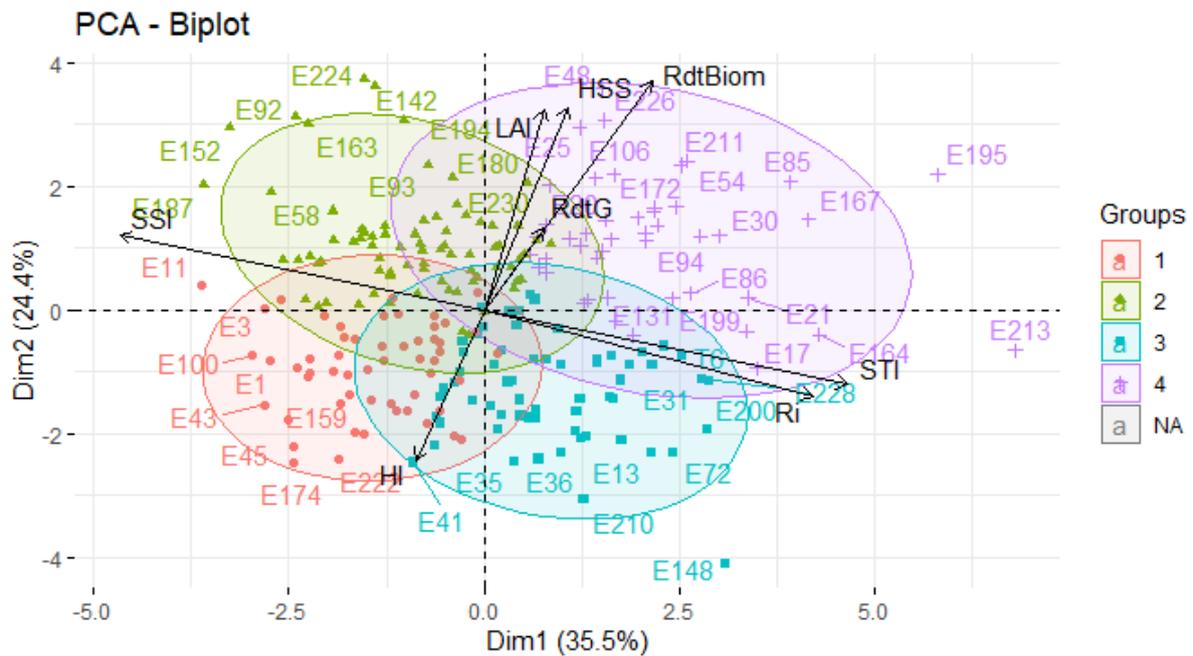
Xu W., Subudhi P.K., Crasta O.R., Rosenow D.T., Mullet J.E., Nguyen H.T. (2000) – Molecular mapping of QTLs conferring stay-green in grain sorghum (*Sorghum bicolor* L, Moench), *Genome*, **43**, 461–469.

Zhang S., Zhao G., Lang K., Su B., Chen X., Xi X., Zhang H. (2019) – Integrated satellite, unmanned aerial vehicle (UAV) and ground inversion of the SPAD of winter wheat in the reviving stage, *Sensors*, **19**, 1485.

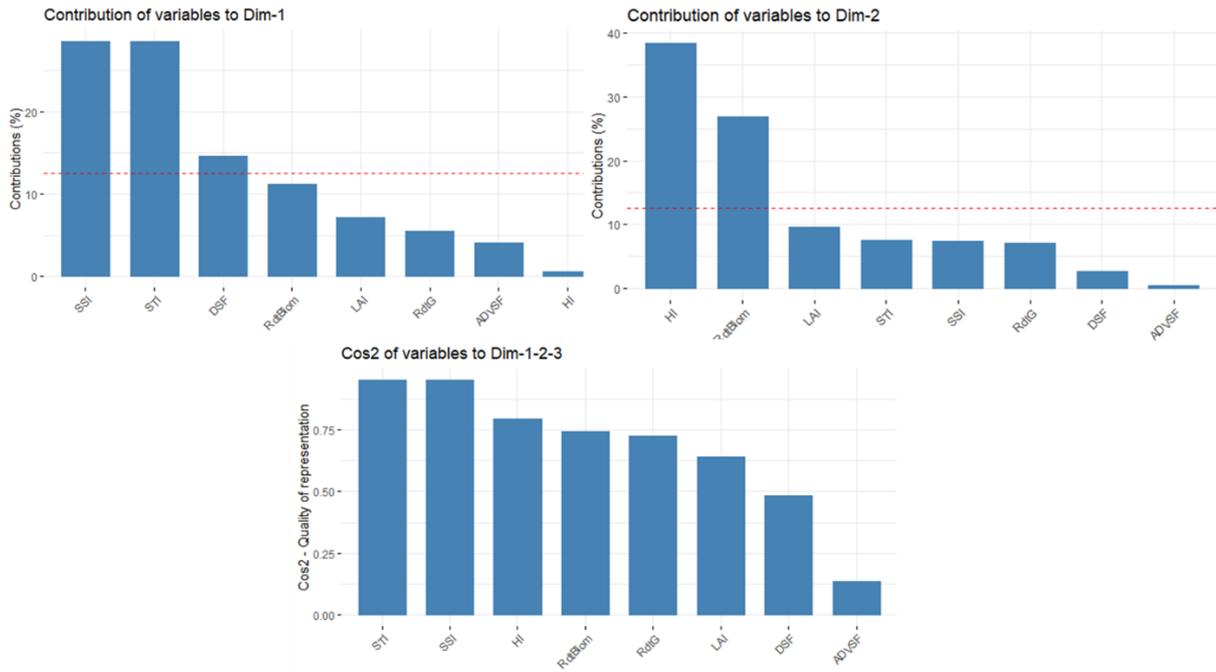
ANNEXES



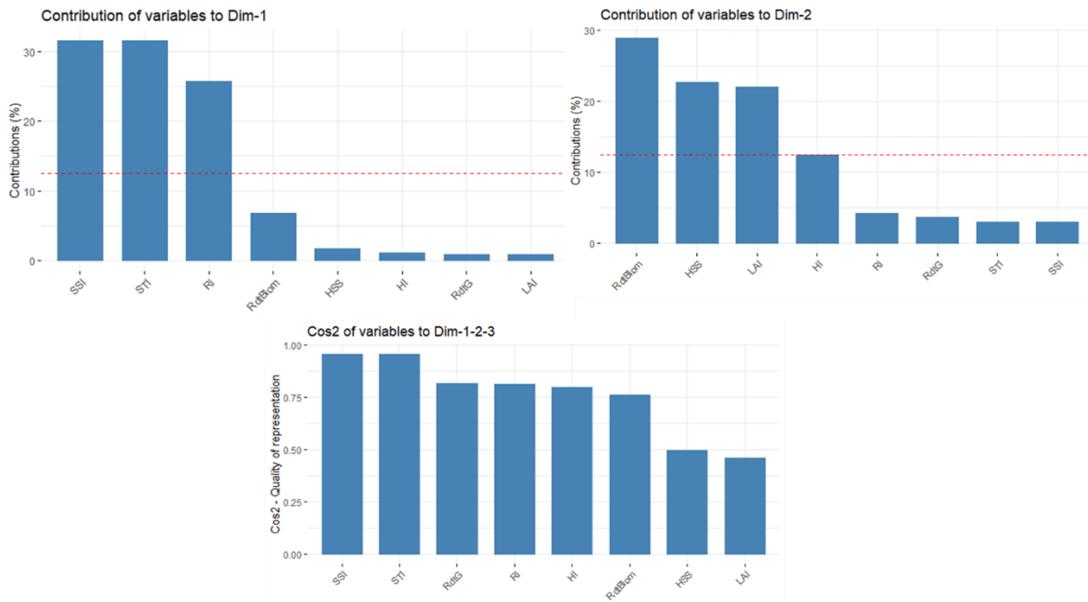
Annexe 1 : Cercle de corrélation du plan 1-2 en STR



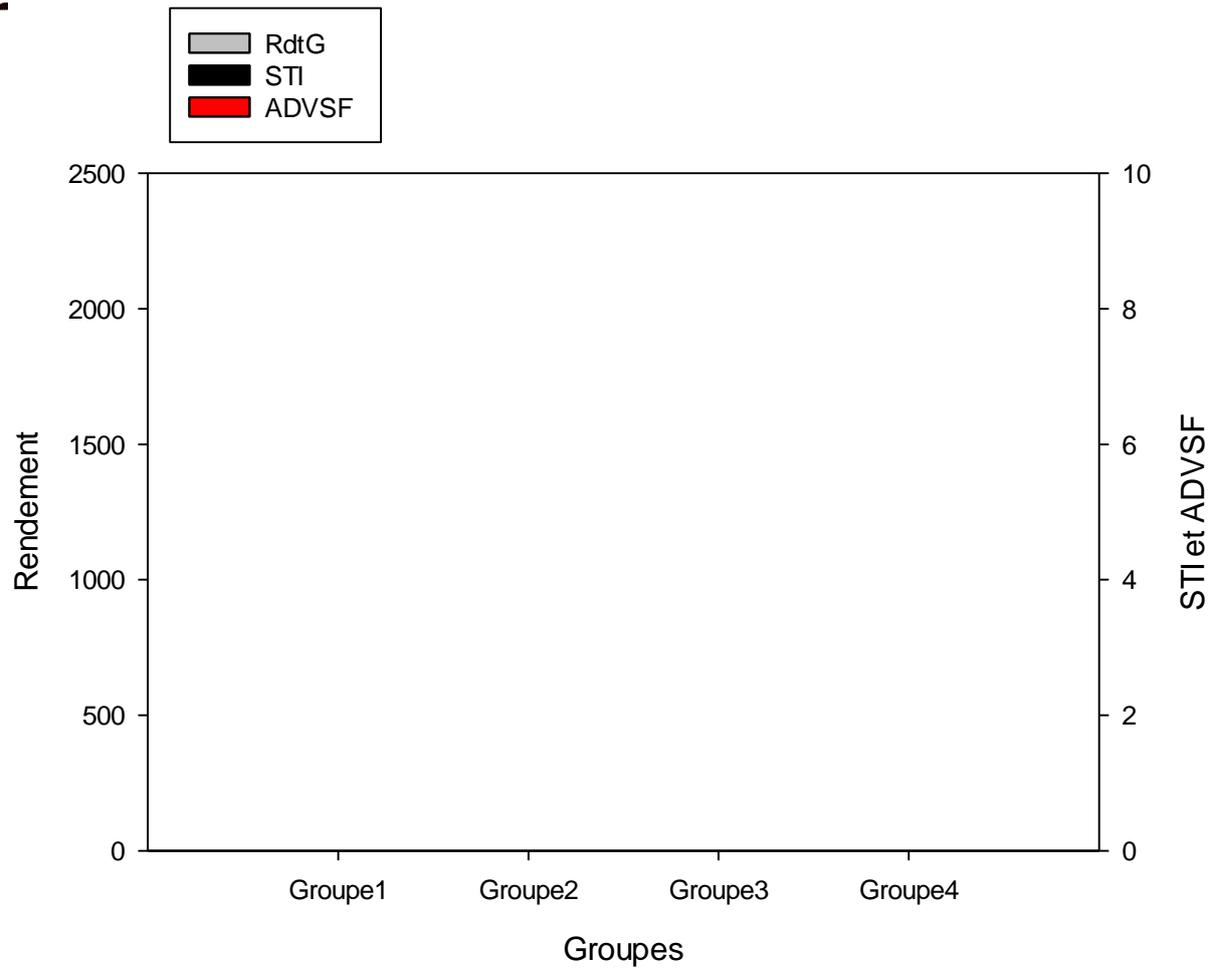
Annexe 2 : Répartition des génotypes selon leur potentiel de tolérance au stress hydrique post-floral en STR



Annexe 3 : Contribution des axes en combinant les données des deux essais



Annexe 4 : Contribution des axes en STR



Annexe5 : Performance des différents groupes

	<i>ADVFSF</i>	<i>STI</i>	<i>Groups</i>
<i>Darou</i>	8,500690	2,043529	a
<i>Nganda</i>	8,200588	1,678103	a
<i>Golobe</i>	6,328000	1,367000	a

Annexe6 : Comparaison des trois sous populations en termes des indices de stay green et de tolérance au stress

Annexe 7 : Performance des 47 meilleures lignées en fonction du STI

<i>Génotypes</i>	<i>RdtG</i>	<i>STI</i>	<i>RdtBiom</i>	<i>ADVSF</i>
<i>E212</i>	2064,07	4,13	22226,56	8,43
<i>E194</i>	1916,67	3,15	21674,11	18,80
<i>E147</i>	1939,06	2,97	34687,50	13,68
<i>E163</i>	1620,32	2,94	25078,13	7,86
<i>E169</i>	2336,96	2,66	17950,52	11,56
<i>E166</i>	1906,77	2,65	27929,69	13,05
<i>E20</i>	1711,79	2,56	22514,58	10,58
<i>E198</i>	1796,29	2,52	14962,30	1,96
<i>E227</i>	2475,03	2,45	16077,38	6,41
<i>E30</i>	2129,54	2,43	28036,46	12,71
<i>E71</i>	1996,88	2,38	27812,50	5,57
<i>E129</i>	1939,12	2,33	20506,94	5,89
<i>E85</i>	1913,78	2,19	21034,23	7,25
<i>E133</i>	1764,12	2,15	17491,67	8,75
<i>E142</i>	2144,74	2,13	16851,39	7,23
<i>E3</i>	1724,81	2,12	18475,00	11,06
<i>E216</i>	1829,29	2,11	16388,02	8,01
<i>E56</i>	1874,09	2,11	16180,56	18,00
<i>E54</i>	1777,67	2,02	23900,00	5,13
<i>E21</i>	1890,63	2,01	27057,29	18,82
<i>E93</i>	1741,38	2,01	20354,17	7,48
<i>E164</i>	1821,51	1,93	17815,97	7,49
<i>E220</i>	2494,07	1,92	19873,96	5,08
<i>E53</i>	1600,42	1,92	19294,05	7,27
<i>E107</i>	2254,69	1,91	15819,44	9,27
<i>E7</i>	2074,38	1,82	18127,61	7,81
<i>E94</i>	1937,20	1,82	15481,77	4,60
<i>E25</i>	2103,82	1,81	23896,53	6,42
<i>E202</i>	1604,17	1,79	21489,58	8,45
<i>E195</i>	1577,11	1,76	27304,69	3,78
<i>E177</i>	1771,34	1,71	13675,10	10,97
<i>E224</i>	1773,88	1,70	20908,86	7,70
<i>E135</i>	1113,46	1,65	20476,19	8,36
<i>E150</i>	1908,16	1,65	19842,26	6,18
<i>E172</i>	1619,84	1,63	22610,42	7,78
<i>E167</i>	1610,43	1,60	20035,94	7,85
<i>E106</i>	1314,76	1,58	26180,56	6,46
<i>E211</i>	1947,76	1,58	23795,58	15,09
<i>E16</i>	1851,94	1,57	25405,51	11,40
<i>E165</i>	1528,46	1,44	18608,33	8,69
<i>E22</i>	1863,94	1,36	26938,24	14,96

<i>E131</i>	2016,93	1,35	18145,83	9,39
<i>E161</i>	2367,68	1,30	30291,67	6,65
<i>E103</i>	1805,52	1,29	21562,50	6,33
<i>E19</i>	1392,71	1,29	33506,94	12,28
<i>E213</i>	1431,88	1,19	22812,50	9,89
<i>E48</i>	2292,22	1,05	29045,14	14,70

RdtG= rendement grain ; *ADVFSF*= stay-green ; *STI*= indice de tolérance au stress ; *RdtBiom*= rendement biomasse,