

UNIVERSITE GASTON BERGER



*L'Excellence au Service
du Développement*

UFR DES SCIENCES AGRONOMIQUES, DE L'AQUACULTURE ET DES
TECHNOLOGIES ALIMENTAIRES

SECTION PRODUCTIONS VEGETALES ET AGRONOMIE

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du diplôme de Master en Production et Transformation des Produits
Agricoles

**Caractérisation agro-morphologique temporelle de variétés
paysannes de mil (*Cenchrus americanus*) au Sénégal**

**Présenté et soutenu publiquement par Aby CISSE
Le 15 juin 2017 devant le jury composé de :**

Président : Pr. Amadou Bocar BAL	Maître de Conférences	UGB
Membres :		
Dr Cécile BERTHOULY-SALAZAR	Chargée de recherche	IRD
Dr Saïdou Nourou SALL	Maître-Assistant	UGB
Dr Anicet Georges B. MANGA	Maître-Assistant	UGB
Dr Alain AUDEBERT	Chargé de Recherche	CIRAD

Encadrement :

Dr Cécile BERTHOULY-SALAZAR, Dr Saïdou Nourou SALL et Dr Ndjido KANE

Année académique 2015-2016

DEDICACE

*Je rends grâce à ALLAH, le très miséricordieux pour la force et le courage qu'il m'a accordé
tout le long de ce travail.*

A ma mère pour tous les sacrifices consentis pour ma réussite et celle de mes frères et sœurs ;

A mon père pour son amour et ses conseils ;

Puisse ALLAH vous bénir et vous garder aussi longtemps pour récolter le fruit de vos efforts.

A Mes frères et sœurs pour leur amour, leur respect et leur soutien ;

*A toutes les familles DIARRA à Saint Louis, DIAKHATE à Dakar, qui m'ont accueilli et
considéré comme une des leurs ;*

A tous mes amis et promotionnaires ;

Je vous dédie ce travail !

Que Dieu vous préserve...

REMERCIEMENTS

Les recherches présentées dans ce mémoire ont été réalisées entre le Laboratoire National de Recherche sur les Productions végétales (LNRPV) et le Centre National de Recherche Agronomique (CNRA) de Bambey, tous deux coiffés par l'Institut Sénégalais de Recherche Agricole du Sénégal (ISRA). Elles s'inscrivent dans le projet CERAO « Adaptation des variétés locales de mil aux changements climatiques » sur la plateforme LMI LAPSE (Laboratoire Mixte International Adaptation des Plantes et microorganismes associés aux Stress Environnementaux).

J'exprime ma reconnaissance toute particulière aux responsables de ces organismes et institutions qui, par leur concours, ont permis le déroulement de ce programme.

Au terme de ce travail, je tiens tout d'abord à exprimer ma profonde reconnaissance à mon encadrante Cécile BERTHOULY SALAZAR pour les précieux conseils qu'elle m'a prodigués et pour l'intérêt soutenu avec lequel elle a entouré ce travail. Aucun mot ne saurait exprimer ma très haute considération et ma grande admiration pour son ardeur au travail et surtout sa simplicité.

Mes remerciements s'adressent également à Saïdou Nourou SALL, pour m'avoir guidé tout le long de ce travail et ailleurs tout au long de mon cursus universitaire par son dévouement, sa disponibilité, sa patience et sa sollicitude, qu'il soit assuré de ma très haute considération et ma grande admiration.

A Dr Ndjido KANE : les animations scientifiques auxquelles vous avez contribué, m'ont permis d'améliorer la qualité scientifique de ce travail. Je vous en remercie infiniment.

A Mr le Président de jury, le Professeur Amadou Bocar BAL: j'exprime ma plus profonde reconnaissance pour l'honneur qu'il m'a fait en acceptant de présider ce jury de mémoire. Qu'il me soit permis de lui témoigner ma très haute considération et ma profonde gratitude. Mes vifs remerciements vont également à l'endroit de Dr Anicet MANGA et Dr Alain AUDEBERT qui ont bien voulu honorer ce jury, pour discuter et juger ce travail. Qu'ils acceptent l'expression de ma sincère reconnaissance et mon profond respect.

Ce travail n'aurait bien entendu pas pu être réalisé si l'Université Gaston Berger, à travers le **Master Production et Transformation des Produits Agricoles, option Productions Végétales et Agronomie** ne m'avait pas permis de suivre cette formation. Ainsi, aux responsables de cette formation, je nomme par là tout le corps enseignant et de recherche ainsi que tout le personnel administratif et technique de l'Unité de Formation et de Recherche des Sciences Agronomiques, de l'Aquaculture et des Technologies Alimentaires (UFR S2ATA) sans oublier les intervenants professionnels, pour nous avoir accompagnés, aidés, soutenus et pour avoir contribué à notre réussite, je vous dis merci.

Je tiens à remercier très chaleureusement les post doctorants, doctorants et camarades stagiaires pour leur sympathie, leur amitié, leur aide. Je cite par-là Katina Floride OLODO pour sa disponibilité, son appui, ses conseils et son amitié, mention spéciale à elle ; Aliou FAYE, mon camarade de classe et co-camarade dans ce projet de recherche ; Adama FAYE pour son assistance ainsi que Clémence SENE.

Aux camarades et amis de l'Université Gaston Berger, particulièrement ceux de l'UFR S2ATTA pour l'affection partagée, la complicité et le soutien inconditionnel, je dis un grand merci et réserve une mention spéciale à Adama BA, Mamoudou CAMARA, Khady DIOUF, Aminata SOW pour avoir toujours été à mes côtés.

Je n'oublierai pas de remercier toutes les personnes rencontrées à Bambey, nos collaborateurs et parents sur le terrain, j'exprime toute ma reconnaissance pour leur sympathie, leur disponibilité, leur soutien.

Je ne saurai terminer sans adresser mes remerciements à l'endroit du personnel de la DAPSA, plus particulièrement Mr. El Hadji Mamadou DIENG NGOM pour son accueil sympathique et sa coopération dans la collecte de données sur les productions agricoles nationales.

Enfin, que toute personne ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail trouve ici l'expression de ma sincère gratitude.

TABLE DES MATIERES

DEDICACE.....	i
REMERCIEMENTS	ii
TABLE DES MATIERES	iv
TABLE DES ILLUSTRATIONS	vii
LISTE DES ANNEXES	x
LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS	xi
RESUME.....	xiii
ABSTRACT	xiv
INTRODUCTION.....	1
1. Contexte et problématique de l'étude	1
2. Objectifs de l'étude et hypothèse de recherche.....	3
I. REVUE BIBLIOGRAPHIQUE.....	4
1. Evolution et adaptation face aux changements climatiques.....	4
2. Caractéristiques, distribution et évolution temporelle des variétés de mil	7
II. MATERIELS ET METHODES	10
1. Collecte des accessions	10
2. Caractérisation agro-morphologique des accessions collectées.....	11
2.1. Site, dispositif expérimental et conduite de l'essai	11
2.1.1. Site.....	11
2.1.2. Dispositif expérimental.....	12
2.1.3. Conduite de l'essai.....	14
2.2. Paramètres étudiés.....	15

2.3. Analyse des données	18
III. RESULTATS	19
1. Analyses descriptives	19
1.1. Caractéristiques des paramètres agro-morphologiques testés chez les variétés paysannes de mil au cours du temps	19
1.2. Corrélations entre les différentes variables testées.....	20
1.3. Analyse en composantes principales	20
2. Variabilité agro-morphologiques des variétés souna testées entre 1970 et 2016	24
2.1. Effet de l'année sur l'épiaison.....	24
2.2. Effet de l'année sur la longueur du brin maitre.....	26
2.3. Effet de l'année sur le diamètre du brin maitre	28
2.4. Effet de l'année sur la fertilité.....	30
2.5. Effet de l'année sur la longueur de l'épi du brin maitre.....	32
2.6. Effet de l'année sur le diamètre de l'épi du brin maitre.....	34
2.7. Effet de l'année sur le poids de 1000 grains	36
2.8. Synthèse des principaux résultats.....	38
IV. DISCUSSION	41
1. Echantillonnage et relations inter-variables	41
2. Diversité agro-morphologique du mil au cours du temps.....	41
2.1. Durée du cycle (semis-épiaison)	41
2.2. Développement végétatif.....	42
2.3. Rendement.....	44
CONCLUSION ET PERSPECTIVES	46

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES 48

ANNEXES xv

TABLE DES ILLUSTRATIONS

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Collection des accessions	11
Tableau 2 : Moyennes et écarts type des variétés de mil testées entre 1970 et 2016 sous 7 variables quantitatives et pourcentage d'aristation pour les deux périodes	19
Tableau 3 : Matrice de corrélation entre les variables mesurées pour les groupes variétaux souna et sanio	20
Tableau 4 : Pourcentages de variations exprimées par les différents axes testés sur l'ACP des deux groupes variétaux (souna et sanio)	21
Tableau 5 : Contribution des variables sur les trois axes retenus (en %) pour les deux groupes variétaux	21
Tableau 6 : Pourcentages de variations exprimées par les différents axes testés sur l'ACP des souna.....	22
Tableau 7 : Contribution des variables sur les trois axes retenus (en %) pour le souna	22
Tableau 8 : Modèles linéaires testés sur l'épiaison avec la p-value du Shapiro test des résidus des modèles, les valeurs de R^2 ajusté, d'AIC et de BIC	25
Tableau 9 : Modèles linéaires testés sur la longueur du brin avec la p-value du Shapiro test des résidus des modèles, les valeurs R^2 ajusté, d'AIC et de BIC.....	27
Tableau 10 : Modèles linéaires testés sur le diamètre du brin avec la p-value du Shapiro test des résidus des modèles, les valeurs de R^2 ajusté, d'AIC et de BIC	29
Tableau 11 : Modèles linéaires testés sur la fertilité avec la p-value du Shapiro test des résidus des modèles, les valeurs de R^2 , d'AIC et de BIC	31
Tableau 12 : Modèles linéaires testés sur la longueur de l'épi avec la p-value du Shapiro test des résidus des modèles, les valeurs de R^2 , d'AIC et de BIC	33

Tableau 13 : Modèles linéaires testés sur le diamètre de l'épi avec la p-value du Shapiro test des résidus des modèles, les valeurs de R2, d'AIC et de BIC.....	35
Tableau 14 : Modèles linéaires testés sur le poids de 1000 grains, avec p-value du Shapiro test des résidus des modèles, les valeurs de R2, d'AIC et de BIC	37
Tableau 15 : Différence entre les années dans chaque site, * si effet année emboité significatif à au moins 5 %	40

LISTES DES FIGURES

Figure 1 : Répartition des sites de collecte (1970 et 2016) au Sénégal.....	10
Figure 2 : Pluviométrie et températures enregistrées sur le site d'étude au cours de l'essai. .	12
Figure 3 : Dispositif expérimental de l'essai.....	13
Figure 4 : Analyse en composantes principales des deux groupes variétaux de mil sur les axes 1 et 2.....	21
Figure 5 : Analyse en composantes principales du profil des variétés souna de 1970 et celles de 2016 sur les axes 1 et 2.....	23
Figure 6 : Analyse en composantes principales sur 12 sites de collecte souna avec les axes 1 et 2.....	23
Figure 7 : Epiaison par années selon les sites	25
Figure 8 : Epiaison par année selon les blocs.....	25
Figure 9 : Valeurs théoriques versus valeurs observées de l'épiaison/Modèle2.....	25
Figure 10 : Longueur brin par année selon les sites	27
Figure 11 : Longueur brin par année et par bloc	27
Figure 12 : Valeurs théoriques versus valeurs observées de la longueur brin/ modèles 2.....	27
Figure 13 : Diamètre brin par année selon les sites.....	29

Figure 14 : Diamètre brin par année et par bloc	29
Figure 15 : Valeurs théoriques versus valeurs observées du diamètre brin/ modèles 3	29
Figure 16 : Fertilités des sites au cours du temps	31
Figure 17 : Fertilité par année et par bloc.....	31
Figure 18 : Valeurs théoriques versus valeurs observées de la fertilité/Modèle 3	31
Figure 19 : Longueur d'épi des sites par année	33
Figure 20 : Longueur d'épi par année et par bloc	33
Figure 21 : Valeurs théoriques versus valeurs observées de la longueur d'épi/ modèles 3	33
Figure 22 : Diamètre épi des sites par année	35
Figure 23 : Diamètre épi par année et par bloc	35
Figure 24 : Valeurs théoriques versus valeurs observées du diamètre épi/Modèle 3.....	35
Figure 25 : Poids de 1000 grains des sites par année	37
Figure 26 : Poids de 1000 grains par année et par bloc.....	37
Figure 27 : Valeurs théoriques versus valeurs observées du poids de 1000 grains/Modèle 3	37

LISTE DES PHOTOS

Photo 1 : Conduite de l'essai	14
Photo 2 : Paramètres observés et ceux mesurés pendant la culture et au moment de la récolte : A) Epiaison. B) Présence d'aristation. C) Comptage de talles. D) Longueur du brin. E) Circonférence du brin. F) Longueur de l'épi. G) Circonférence de l'épi. H) Epi identifié pour le battage	16
Photo 3 : Opérations post récolte.....	17

LISTE DES ANNEXES

Annexe 1 : Carte de translation des isohyètes au Sénégal xv

Annexe 2 : Evolution de la production agricole au Sénégal..... xvi

Annexe 3 : Etapes de développement du mil..... xxi

LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS

°C	Degré Celsius
ACP	Analyse en composantes principales
AIC	Critère d'Information d'Akaike, en anglais Akaike Information Criterion
ANCAR	Agence Nationale de Conseil Agricole et Rural
ANR	Agence Nationale de la Recherche Française
BIC	Critère d'Information Basévien, en anglais Bayesian Information Criterion
CDKG2	Cyclin-Dependent Kinase G2
CERAO	Auto-adaptation des agro-socio-écosystèmes tropicaux face aux changements globaux
cm	Centimètre
CNRA	Centre National de Recherche Agronomique
DAPSA	Direction de l'Analyse de la Prévision et des Statistiques Agricoles
EC	Concentré Emulsionnable
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations (Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture)
g	Gramme
GIEC	Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat
Ha	Hectare
IRD	Institut de Recherche pour le Développement
ISRA	Institut Sénégalais de Recherche Agricole
kg	Kilogramme
l	Litre
LAPSE	Adaptation des Plantes et Microorganismes associés aux Stress Environnementaux
LNRPV	Laboratoire National de Recherches sur les Productions Végétales
M	Modèle
m	Mètre
m²	Mètre carré
mm	Millimètre
N	Nord, en anglais North
NPK	Azote-Phosphate-Potassium

O	Ouest
p	Probabilité de valeur (P-value)
PSE	Plan Sénégal Emergeant
SAED	Société Nationale d'Aménagement et d'Exploitation des Terres du Delta du Fleuve Sénégal et des Vallées du Fleuve Sénégal et de la Falémé
SODAGRI	Société de Développement Agricole et Industriel du Sénégal
SODEVA	Société de Développement et de Vulgarisation Agricole
TIRPAA	Traité International sur les Ressources Phytogénétiques pour l'Alimentation et l'Agriculture
Tmoy	Température moyenne
UGB	Université Gaston Berger

RESUME

Le Sénégal, à l'instar des autres pays du Sahel, connaît des épisodes de sécheresse depuis 1970. Celles-ci auraient potentiellement affecté la phénologie des cultures pluviales, en particulier dans les zones les plus arides. Pour mesurer l'évolution des variétés paysannes de mil au Sénégal et analyser leur adaptation face aux sécheresses de ces dernières décennies, nous avons étudié l'évolution agronomique de deux collections de variétés locales prospectées à plus de 40 ans d'intervalle. Avec un essai conduit au CNRA de Bambey (14°42'N, 16°28'O), nous avons utilisé un dispositif expérimental avec trois répétitions. Pour 32 accessions de mil cultivé (28 variétés de mil précoce « Souna » et 4 variétés de mil tardif « Sanio »), nous avons mesuré 11 traits agro-morphologiques de variétés paysannes de mil collectées en 1970 et en 2016 dans les mêmes 16 villages (sites) au Sénégal. Dans l'analyse des résultats, nous nous sommes focalisés sur les variétés Souna, puisque le faible nombre de variétés Sanio ne permettait pas d'avoir un « pouvoir » statistique suffisant. Nos résultats montrent que pour la hauteur de la plante et la longueur de l'épi, il existe des différences significatives entre les variétés de 1970 et celles de 2016. Par contre, pour les variables d'épiaison, de diamètre du brin maître et de son épi, de fertilité et de poids de 1000 grains, des différences significatives claires n'ont pas pu être mises en évidence. En effet, nous avons démontré un effet "année" chez les variétés souvent masqué par un effet "site" d'échantillonnage (i.e. villages), soulignant la forte variabilité au sein du mil Souna. En définitive, même si nos résultats ne mettent pas en évidence une réduction claire du cycle de floraison, un mécanisme adaptatif très souvent observé chez les plantes faces aux changements climatiques, le raccourcissement de la longueur de l'épi et de la hauteur des plantes dans les variétés paysannes de mil au Sénégal au cours de ces 40 dernières années pourrait signifier un effet adaptatif qui mériterait d'être confirmé par des essais multi locaux et d'être mieux compris par des études plus poussées.

Mots clés : sécheresse, phénologie, morphologie, mil, variétés paysannes, adaptation, Sénégal

ABSTRACT

Senegal, like other Sahelian countries, has experienced period droughts since 1970. This could have potentially affected the phenology of rainfed crops, especially in the most arid areas. To understand the evolution of pearl millet varieties in Senegal and to analyze their adaptation to recent decade's droughts, we studied agronomic evolution of two collections of pearl millet varieties prospected between 1970 and 2016 in the same 16 villages. An experimental design with three repeats was set up at the CNRA of Bambey (14 ° 42'N, 16 ° 28'W). This experimental design was used for characterising 32 pearl millet accessions (28 varieties of early-flowering millet "Souna" and 4 varieties of late-flowering millet "Sanio"). We measured 11 agro morphological feature. Nevertheless, in the analysis of the results, we focus on Souna variety, as small number of Sanio accessions did not allowed to test for significance. Our results showed that for plant height and spike length; there were significant differences between 1970 and 2016 varieties. On the other hand, for flowering time, plants and spike diameter, fertility and seed weight, clear significant differences could not be demonstrated. Indeed, this effect was often masked by the sampling site (i.e. village) effect, underlining the high variability between accessions within the Souna variety. Finally, even if our results did not showed a clear reduction in the flowering cycle, an adaptive mechanism very often observed in plants facing climate change, the significant reduction of plant height and spike length in traditional varieties of millet in Senegal during last 40 years may underlay an adaptive effect which deserves to be confirmed by multifocal trials, and more understood by further studies.

Keywords: Drought, phenology, morphology, pearl millet varieties, evolution, adaptation, Senegal

INTRODUCTION

INTRODUCTION

1. Contexte et problématique de l'étude

Le monde est marqué par de profondes et significatives mutations avec des évolutions lourdes de conséquences. Avec une croissance démographique importante, soit environ 9.1 milliards d'habitants attendus en 2050 d'après les statistiques des Nations Unies (FAO, 2009), l'agriculture sera confrontée à une importante augmentation de la demande alimentaire. Celle-ci augmenterait de 70% d'ici 2050 (FAO, 2009). Elle serait d'autant plus marquée dans les pays en développement et concernerait surtout les céréales, qui constituent la base de l'alimentation des populations.

D'un autre côté, des changements climatiques, caractérisés par une modification du régime et de l'intensité des pluies ainsi qu'une hausse des températures, viennent s'ajouter aux défis à relever pour l'économie agricole. Dès les années 70, des changements climatiques ont été observés dans la région sahélienne et se sont maintenus dès lors (Dai, 2011). Les scénarii décrivant l'évolution du climat ont montré une augmentation de la fréquence et de la durée de phénomènes climatiques extrêmes ces dernières décennies. L'Afrique apparaît comme le continent le plus vulnérable aux changements climatiques (GIEC, 2014), notamment l'Afrique de l'ouest où l'augmentation des températures est prévue entre +1,5°C à + 4°C (Rowell, 2006), avec de fortes variations et incertitudes sur la pluviométrie (Sylla *et al.*, 2015).

Etroitement dépendant de l'agriculture pluviale pour des surfaces cultivées estimées à 93 % (Sultan *et al.*, 2015), le modèle agricole familial subsaharien pourrait être fortement affecté par les changements climatiques notamment sur le comportement des cultures et sur leurs rendements. Les réchauffements constatés depuis 1970 affectent déjà les productions mondiales de maïs et de blé, avec une baisse de rendements de 3,8 et 5,5 %, respectivement (Lobell *et al.*, 2011). Des résultats rapportés par Sultan *et al.* (2015) montrent des baisses de rendement de 17 %, 5 %, 15 % et 10 %, respectivement pour le blé, le maïs, le sorgho et le mil en Afrique.

A l'instar des autres pays du Sahel, le Sénégal fait face aux mêmes défis. Avec près de 14 millions d'habitants en 2014, le Sénégal connaît une forte dynamique de croissance démographique de l'ordre de 2,7 % par an (PSE, 2014). Le Sénégal n'a pas, par ailleurs, été épargné par les perturbations d'ordre climatique. Une modification du régime des précipitations a été observée (Dacosta *et al.*, 2002 ; annexe 1). Celle-ci s'observe par un retrait des isohyètes sur près de 100 km vers le Sud.

Le secteur agricole sénégalais repose à 90% sur des exploitations familiales (PSE, 2014). Majoritairement tributaire de la pluie, ces petites exploitations, voire les agrosystèmes dans leur ensemble, devront être capables de s'adapter aux changements climatiques et d'atténuer leurs effets afin de subvenir aux besoins alimentaires croissants des populations.

En région sahélienne, les cultures céréalières sont une composante essentielle de l'agriculture. L'alimentation dans cette région du globe repose essentiellement sur le mil [*Cenchrus americanus*]. Céréale domestiquée à partir du mil sauvage [*Pennisetum glaucum monodii*], le mil est une culture vivrière très tolérante au déficit hydrique. Pourtant, peu de programme d'amélioration du mil en Afrique de l'Ouest sont notés. Grand absent dans le programme agricole du plan Sénégal émergent (PSE), le mil, céréale la plus importante en termes de rendement devant le riz, le maïs et le sorgho (DAPSA, 2013), n'occupe pas une place prioritaire dans les programmes agricoles au Sénégal. Seules quelques variétés améliorées sont développées et peu de semences certifiées sont distribuées. Les semences cultivées sont ainsi principalement constituées de variétés paysannes. Malgré sa position de céréale dominante et adaptée à la sécheresse dans nos régions, on assiste à peu d'évolution de cette culture. Entre 1990 et 2013, la production de mil au Sénégal n'a en moyenne été multipliée que par 1,1 sans augmentation de surface cultivée (DAPSA, 2013). Les changements environnementaux observés pourraient potentiellement être mis en cause. Dès lors, analyser l'évolution de la culture du mil et ses capacités d'adaptation potentielles face aux épisodes de sécheresse et les températures en hausses, ouvre un « champ » très vaste de recherche et mérite une attention particulière.

Dans l'agriculture traditionnelle, les paysans sont fortement impliqués dans l'évolution des plantes car ils régénèrent leurs propres semences. Labeyrie (2013) dans ses travaux, souligne le rôle majeur joué par l'action anthropique sur la diversité des plantes cultivées, à travers la diffusion et la sélection de semences. Les paysans ont ainsi un impact très fort sur la diversité des plantes qu'ils cultivent. Cette diversité est un atout majeur permettant aux plantes de faire face aux variabilités environnementales. Qu'il s'agisse d'adoption de nouvelles variétés, ou l'adaptation des variétés existantes aux nouvelles conditions, l'évolution du mil cultivé dépend en grande partie des stratégies paysannes. Au Niger, une réduction du cycle de floraison des variétés paysannes pendant l'épisode de sécheresse 1970-2000 a été observée (Vigouroux et *al.*, 2011). Les changements climatiques ainsi que les pratiques paysannes en réponse à ces changements peuvent donc fortement influencer le comportement des variétés cultivées.

Dès lors, comprendre comment les variétés traditionnelles de mil au Sénégal, au travers des choix paysans, ont évolué face aux changements climatiques est d'une importance capitale pour permettre l'adaptation de l'agriculture sénégalaise aux conditions futures. Notre présent travail intitulé "**Caractérisation agro-morphologique temporelle de variétés paysannes de mil au Sénégal**" s'inscrit dans l'objectif global du projet ANR CERAO, avec un volet phénotypage et un volet génotypage. Ce projet aura pour finalité d'évaluer l'adaptation potentielle des variétés locales de mil aux changements climatiques. Dans ce présent travail, c'est le volet phénotypage qui sera traité.

2. Objectifs de l'étude et hypothèse de recherche

L'objectif général de notre étude est de caractériser les évolutions agro-morphologiques au cours de ces quarante dernières années chez le mil cultivé avec pour perspectives d'évaluer leurs potentiels adaptatifs face aux changements climatiques présents et futurs.

De façon spécifique il s'agit de :

- Caractériser 16 sites de mil traditionnel de 1970 et de 2016
- Comparer les différences agro-morphologiques entre ces deux périodes.

Pour étudier l'adaptation des variétés de mil au Sénégal, l'hypothèse majeure est que les variétés actuelles sont phénotypiquement différentes des variétés anciennes des années 1970.

Le présent travail sera abordé avec en chapitre I, une revue de la littérature sur la thématique abordée. Le chapitre II sera consacré à la présentation des matériels et des méthodes utilisés. Dans le chapitre III, nous présenterons les résultats qui feront l'objet d'une discussion dans le chapitre IV.

CHAPITRE I

REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

I. REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

1. Evolution et adaptation face aux changements climatiques

Les changements climatiques auront un impact fort sur la biodiversité aussi bien sur la distribution que la survie ou l'extinction pour certaines espèces; cette perte de diversité pouvant représenter jusqu'à 8,9 % de la richesse spécifique des écosystèmes (Gruner et *al.*, 2016). Un grand nombre d'études a déjà mis en évidence des liens directs entre les changements climatiques et les changements écologiques et évolutifs des espèces (Parmesan, 2006). Pour faire face aux changements climatiques, les espèces peuvent adopter trois stratégies :

- ❖ migrer
- ❖ tolérer (donc disposer d'une plasticité)
- ❖ s'adapter

La migration

Plusieurs espèces ont adopté une stratégie d'évitement en modifiant leur répartition géographique. Une étude sur 37 espèces de libellules au Royaume-Unis a mis en évidence un déplacement sur plus de 80 km vers le nord de leur aire de distribution initiale entre 1960-1995 (Hickling, 2005). Au Pays-Bas, la diversité et la répartition des lichens se sont fortement transformées notamment avec la colonisation par 77 nouvelles espèces provenant du sud (van Herk et *al.*, 2002). Ces modifications d'aire de répartition touchent aussi bien les espèces sauvages que les espèces cultivées. Il est attendu une redistribution mondiale de certaines espèces cultivées comme c'est le cas de la tomate, l'une des espèces cultivées les plus importantes à l'échelle mondiale (Silva et *al.*, 2016). Avec les conditions climatiques changeantes, les zones à climat plus chaud et sec deviendront inadaptées pour un développement en plein champ de la tomate. Celle-ci aura une croissance adaptée ou optimale dans des zones où le stress dû au froid aura diminué et où il fera moins chaud.

Cette redistribution pouvant aussi se faire localement comme pour le maïs où les paysans se sont adaptés en cultivant leur maïs à des altitudes de plus en plus élevées (Skarbø et VanderMolen, 2015).

L'adaptation

- *Modification du cycle et ses conséquences*

Au-delà de la stratégie d'évitement par un déplacement, des stratégies au travers d'adaptations phénologiques peuvent également apparaître. Dans un article de synthèse, plus de la moitié des espèces (59 %) sur les 1598 étudiées, présentaient des changements phénologiques notables (Parmesan et Yohe, 2003). Chez les oiseaux, de nombreuses études ont pu mettre en évidence une modification de la période de pontes (Dunn et Winkler, 1999 ; Both et *al.*, 2004). Des observations similaires peuvent être faites chez un grand nombre d'espèces comme chez les papillons (Forister et Shapiro, 2003), les amphibiens (Beebee, 1995). Chez les plantes, la fitness dépend principalement de la réponse à la température, la photopériode et la vernalisation, même si d'autres facteurs comme la sécheresse peuvent affecter leur développement (Slama et *al.*, 2005). Leur sensibilité à la photopériode ou la vernalisation les protègent d'une phase de croissance en conditions défavorables (Körner et Basler, 2010). La température joue un rôle important sur la date de floraison, la chute et la coloration des feuilles (Menzel et *al.*, 2001 ; Sparks et Menzel, 2002 ; Menzel, 2003). En effet, parmi les modifications phénologiques observées sous l'effet des variations saisonnières de températures chez certaines espèces, les auteurs énoncent souvent des rallongements ou des réductions du nombre de jours dans les calendriers de floraison. L'ampleur des anomalies de l'alternance de périodes chaudes et fraîches a été évaluée à partir d'observations phénologiques. A titre d'exemple, chez le noisetier commun (*Corylus avellana L.*), la date de floraison a été avancée (Luterbacher et *al.*, 2007). Une analyse des mesures phénologiques en Allemagne sur l'avoine de 1959 à 2009 a mis en évidence un avancement de tous les stades phénologiques d'environ 10 jours, aussi bien pour la floraison que pour la date de récolte (Siebert et Ewert, 2012). Par ailleurs, des analyses phénotypiques sur le blé et l'orge sauvage réalisées sur 28 ans d'intervalle en Israël montrent un profond changement adaptatif de ces céréales en termes de précocité (Nevo et *al.*, 2011).

Les changements phénologiques sont souvent considérés comme des réponses aux conditions climatiques des mois précédents. Néanmoins, un nombre grandissant d'études souligne l'impact des conditions de la saison précédente sur le comportement des cultures. On pourrait par exemple se pencher sur des études menées sur des colchiques (Sparks et *al.*, 2000) ou encore sur plusieurs autres espèces (Fitter et *al.*, 1995 ; Luterbacher et *al.*, 2007 ; Crimmins et

al., 2010). Heide (2003) rapporte que les températures d'automne étaient significativement corrélées avec le nombre de jours d'éclatement des bourgeons dans le printemps qui a suivi, pour plusieurs espèces végétales.

Les modifications phénologiques telles que la date de floraison sont de véritables stratégies adaptatives qui permettent d'éviter des stress comme la salinité, les températures extrêmes et la sécheresse (Kazan et Lyons, 2015). Ces modifications suggèrent des événements moléculaires associés à la tolérance au stress abiotiques et biotiques et à la floraison des plantes. Les analyses de ces auteurs ont montré que les hormones végétales jouent un rôle important dans la réponse au stress. C'est le cas avec *Arabidopsis thaliana*, où dans une analyse tirée de Ma et *al.*, (2015), Kazan et Lyons (2015) ont précisé l'implication de l'hormone CDKG2 dans la réponse de la plante au stress salin et du temps de floraison. Ils ont par ailleurs souligné l'implication de certains gènes dans divers processus végétaux liés aux réponses des plantes aux stress du milieu. Sur des cultures telles que le riz, le blé ou encore l'orge, ils ont observé une floraison précoce des espèces pour échapper au stress de salinité, de température et de sécheresse avec des mécanismes caractéristiques d'activation de gènes réactifs ou de médiateurs chimiques qui sous-tendent le contrôle de la floraison et la tolérance à ces stress.

Néanmoins, il faut aussi noter que si les changements phénologiques des plantes peuvent leur permettre d'éviter des conditions défavorables, ils peuvent également avoir des conséquences négatives non négligeables sur les interactions plantes-pollinisateurs. Des disparités phénologiques entre les plantes et les pollinisateurs ont déjà été démontrées (McKinney et *al.*, 2012 ; Burkle et *al.*, 2013 ; Kudo et Ida, 2013). En effet, les interactions plantes-pollinisateurs semblent relativement synchrones. Dès lors, un changement dans le temps d'apparition de la floraison entraîne des disparités entre les pollinisateurs et leur principale source alimentaire, induisant par conséquent des effets en cascades potentiels sur les pollinisateurs en particulier et dans l'écosystème de manière générale (Crimmins et *al.*, 2010). Des changements mineurs dans le calendrier des événements phénologiques peuvent entraîner des disparités temporelles, des extinctions d'espèces non-aléatoires et la perte de co-occurrences spatiales entre des espèces existantes dans des paysages modifiés (Burkle et *al.*, 2013). De là, c'est la production de grains même, qui sera affectée. Sur cet élan, McKinney et *al.* (2012), dans leurs travaux portant sur des éphémères du printemps (*Corydalis ambigua*) et leurs pollinisateurs (abeilles

reines), ont montré un faible service de pollinisation suite au rallongement de la date de floraison, entraînant une baisse de la production de semences.

- ***Autres formes d'adaptation***

Parmi d'autres stratégies d'adaptations, Slama et *al.* (2005) dans leurs travaux, ont identifié des modifications morphologiques chez des céréales cultivées en Tunisie ; des modifications telles que la réduction du tallage, le développement de barbes (qui augmentent la surface photosynthétique, améliorent les rendements et dissipent la chaleur) comme stratégies limitant les effets de stress hydrique et améliorant les rendements. D'autres auteurs annoncent des réductions de la surface foliaire, de la hauteur des plantes ou encore de leurs épis (Zgallai et *al.*, 2007 ; Vigouroux et *al.*, 2011 ; Dib et *al.*, 1992).

Génétique et réponses des plantes face aux stress

Les capacités de réponses des plantes face aux stress sont liées à la diversité génétique (Doi et *al.*, 2010; Zhu et *al.*, 2000). En effet, il est stipulé que la variation des réponses phénologiques chez les plantes peut être due à la diversité génétique au sein des espèces car celle-ci augmente la diversité des réponses physiologiques à la température. Sur cet élan, une évaluation des effets de la diversité génétique sur les variations des réponses phénologiques a été menée sur des clones à faible variance, des cultivés et des sauvages, en vue d'estimer les variations régionales de date de floraison et de l'éclatement du bouton floral au Japon (Doi et *al.*, 2010). Il en ressort que les variations dans les réponses des espèces végétales avec une faible diversité génétique sont remarquablement inférieures à celles des espèces ayant une plus grande diversité génétique.

2. Caractéristiques, distribution et évolution temporelle des variétés de mil

Appartenant à la famille des poacées, le mil pénicillaire ou petit mil (*Cenchrus americanus*) est une plante annuelle sexuée, diploïde ($2x=2n=14$), allogame grâce à une floraison femelle plus précoce que la floraison male. Sa pollinisation est essentiellement anémophile. Parmi les céréales utilisées comme nourriture humaine dans les pays du Sahel, le mil apparaît comme la plus tolérante à la sécheresse (Bezançon et *al.*, 1997). Celui-ci, encore plus que le sorgho, est effectivement très adapté aux conditions climatiques difficiles et aux sols pauvres qui prévalent dans le Sahel.

Dans la taxonomie du mil, on distingue une forme sauvage *Pennisetum glaucum monodii* à partir de laquelle la forme cultivée (*Cenchrus americanus*), initialement connu sous le terme *Pennisetum glaucum glaucum*, a été domestiquée. Après sa domestication en Afrique de l'Ouest il y a environ 4800 ans (Clotault et al., 2012, Oumar et al., 2008), le mil s'est répandu en Afrique de l'Est et de là en Afrique australe, puis sur le sous-continent indien il y a plus de 3500 ans (Manning et al., 2011). Il a atteint l'Amérique du Sud au 18^{ème} siècle et les États Unis au 19^{ème} siècle. Cependant, il reste principalement cultivé en Afrique et en Asie, régions auxquelles on attribue plus de 95 % de la production mondiale (FAOSTAT, 2017). Le Sénégal fait partie des grands producteurs de mil dans le monde (FAOSTAT, 2013). Dans cette région du sahel, le mil constitue la céréale la plus importante en termes de rendement devant le riz, le maïs et le sorgho (DAPSA, 2013).

Dans la forme cultivée, une variabilité agro-morphologique et génétique permet de classer les variétés de mil en groupe « précoce » (à cycle court), adapté aux régions à faible pluviométrie (150 à 800 mm) et en groupe « tardif » (à cycle long), adapté aux régions à pluviométrie importante (900 à 1200 mm) (Bezançon et al., 1997 ; Tostain, 1998).

Parmi les variétés de mil cultivées, les variétés paysannes, du fait de leur photopériodisme, sont présentées comme les plus aptes à répondre aux variations de pluviométrie (Sultan et al., 2013). Malgré leur faible potentiel de production, ces variétés présentent des caractères de rusticité propres aux écotypes locaux. En effet, la longue histoire de sélection par les paysans, d'échanges de semences et les possibles flux de gènes entre les types sauvages et domestiqués, a assuré le maintien de la diversité de mil (Lewis, 2010).

Des études sur les tendances des variétés locales cultivées ont, dans une certaine mesure, permis de montrer qu'il n'y a à peu près pas de changements majeurs. Globalement une stabilité des variétés locales cultivées a été notée. Par conséquent, il semble que peu ou pas de remplacement de variétés ont eu lieu au cours du temps. C'est ce que Vigouroux et al. (2011) dans leurs travaux sur l'évolution des variétés locales de mil cultivées au Niger ont découvert. Néanmoins, ils ont annoncé une tendance à la baisse de l'apparition de groupes variétaux à floraison tardive et une propagation des groupes de variétés de mil anciennes relativement mineurs.

La disparition ou la propagation, façonnée directement par les choix des individus des variétés cultivées, a certainement joué un rôle dans les changements qui ont eu lieu entre 1976 et 2003; des changements morpho-phénotypiques du mil local face à un environnement changeant. En effet, il a été noté un raccourcissement du cycle de floraison de 1 jour (1,2 jours plus précisément) des variétés paysannes pendant la période de 1970-2000 (Vigouroux et *al.*, 2011). Par la même, une réduction significative de la taille des plantes de 6,6 cm et de leurs épis de 4,5 cm a été notée chez les mêmes variétés échantillonnées dans les mêmes villages pour les deux périodes étudiées.

Compte tenu de toutes ces études sur les évolutions des cultures, qui ont à tour de rôle énoncé des changements morpho-phénotypiques importantes, il est essentiel de multiplier les recherches sur l'évolution des variétés cultivées, en particulier les variétés locales pour pouvoir démontrer des évolutions adaptatives potentielles à l'échelle temporelle.

CHAPITRE II

MATERIELS ET METHODES

II. MATERIELS ET METHODES

1. Collecte des accessions

Cette étude s'est basée sur la collection de mil du Sénégal datant de 1970 et disponible à l'ISRA (Institut Sénégalais de Recherche Agricole). A cet effet, plus de 91 sites ont été revisités en 2016. Une enquête auprès de chaque paysan a été menée afin de déterminer l'origine des semences et de s'assurer que depuis les années 1970, la variété cultivée est restée la même et n'avait pas été remplacée par une autre variété sur le site. Sur l'ensemble des sites visités, 16 villages avaient conservé les mêmes variétés. Nous avons par-là collecté des semences au grenier avec l'accord des paysans. Le consentement préalable de chaque paysan, tel qu'inscrit dans le TIRPAA (<http://www.planttreaty.org/fr>), a été obtenu. Le matériel végétal utilisé est constitué de 32 accessions de mil cultivé (28 mil précoces « souna » et 4 mil tardifs « sanio ») répartis sur 16 sites de production du mil au Sénégal (figure 1). Ainsi donc, pour chaque site deux accessions ont été utilisées : une collecte en 1970 et une collecte sur le même site en 2016.

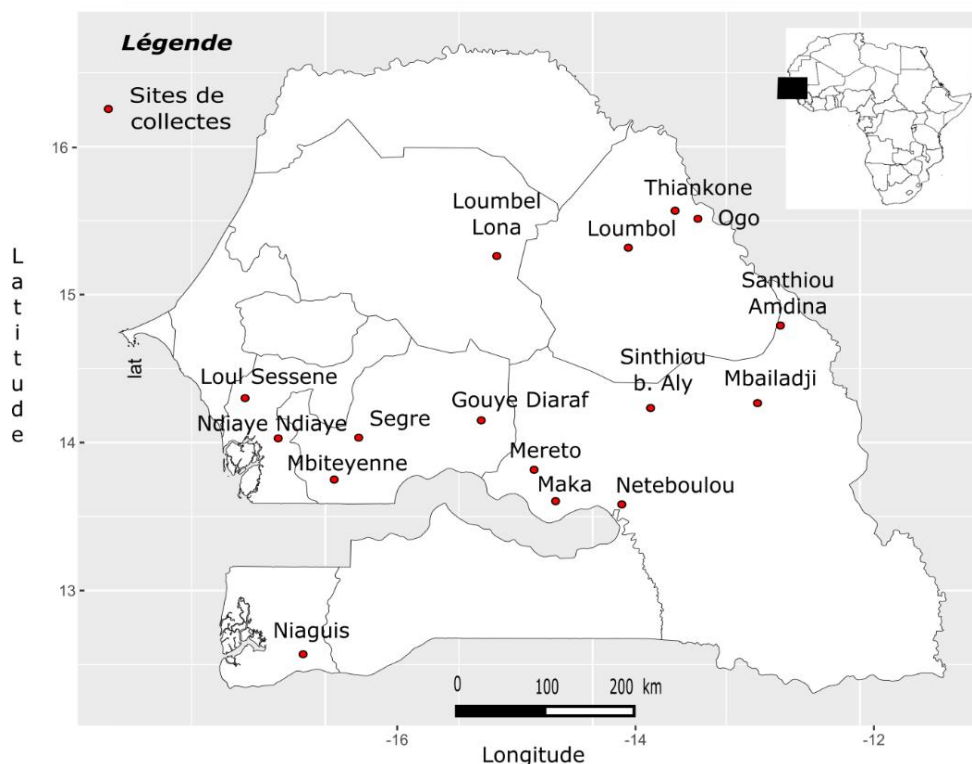


Figure 1 : Répartition des sites de collecte (1970 et 2016) au Sénégal

Tableau 1 : Collection des accessions

Region	Site (village)	Code Site	Type Variétal
Matam	Thiankone	1414	Souna
Matam	Loumbol	1417	Souna
Matam	Ogo	1448	Souna
Matam	Loumbel Iona	1455	Souna
Fatick	Loul Sessene	1460	Souna
Fatick	Ndiaye Ndiaye	1477	Souna
Kaffrine	Segre	1490	Souna
Kaolack	Mbiteyenne	1495	Souna
Kaffrine	Gouye Diaraf	1501	Souna
Kaffrine	Mereto	1522	Souna
Kaffrine	MAKA	1525	Souna
Bakel	Mbailadji	1533	Souna
Tambacounda	Sinthiou bocar aly	1539	Souna
Bakel	Santhiou madina	1540	Souna
Tambacounda	Neteboulou	1587	Sanio
Ziguinchor	Niaguis	1637	Sanio

2. Caractérisation agro-morphologique des accessions collectées

2.1. Site, dispositif expérimental et conduite de l'essai

2.1.1. Site

Les essais ont été conduits entre août (semis le 03 août) et fin décembre 2016 sur la station ISRA–CNRA de Bambey située entre la latitude 14°42'N et la longitude 16°28'O. Le site se caractérise par un sol sablo-ferrugineux tropical, communément appelé sol « Dior ». Les données climatiques du site d'étude sont présentées dans la figure 2. Cette dernière montre que les températures ont généralement tourné autour de 30°C et la pluviométrie était généralement en dessous de 20^{mm} (2^{m3}) par jour de pluie.

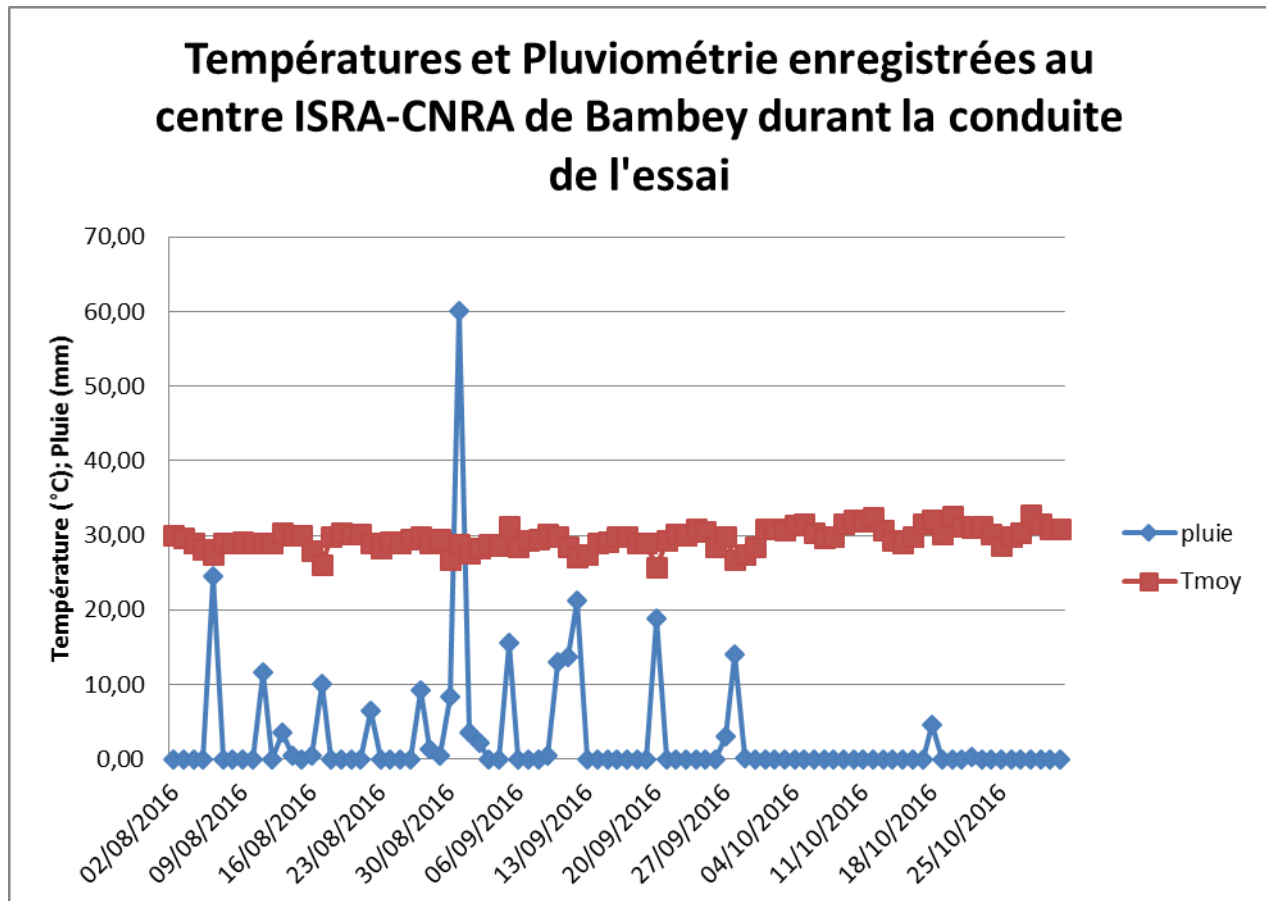


Figure 2 : Pluviométrie et températures enregistrées sur le site d'étude au cours de l'essai

(Source de données : Station météorologique du CNRA de Bambey).

2.1.2. Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental utilisé est un bloc de Fisher avec des accessions comme unités parcelaires et trois répétitions (blocs) : 32 accessions avec pour chacune d'elle 30 individus par bloc, soit un total de 90 individus par accession ont été mesurés.

Au sein d'une répétition, chaque accession est semée sur une ligne de 30 m avec un écartement de 0,9 m entre les poquets et 0,9 m entre les lignes. Au total, nous avons semé 2880 plants (30 plants * 32 accessions * 3 blocs), tous devant être mesurés. Les répétitions étaient espacées de 1,8 m chacune, séparées par une bordure de mil « Souna 3 ». La figure 3 présente le design de l'essai. Chaque ligne a porté une identification. Il s'agit d'étiquettes sur bâches imprimées, portant le code de l'accession concernée et le numéro de l'individu. Chaque début de ligne est marqué par un piquet placé au niveau du premier poquet. Au niveau

des autres pieds, les étiquettes ont été placées sur le brin maitre de la plante (ou brin dominant), identifié au démariage.

32 accessions x 30 plantes x 3 blocs
32 lignes ou rangées espacées de 0.9m

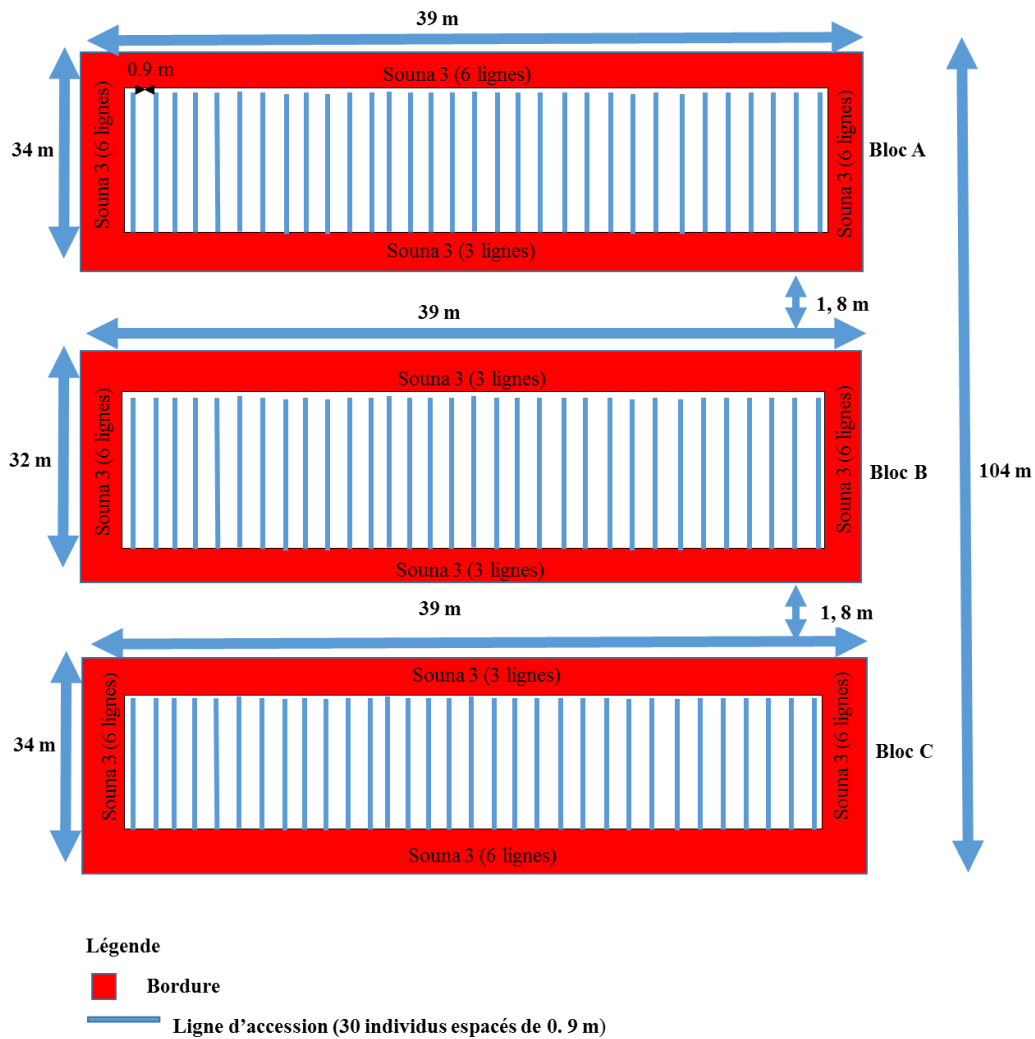


Figure 3 : Dispositif expérimental de l'essai

2.1.3. Conduite de l'essai

L'essai a été d'abord conduit par une préparation de la parcelle, avec un labour initial léger. Après le semis d'une pincée de grains par poquet et quinze jours après la levée des cultures, un premier démariage manuel à 3 plants par poquet fut effectué. Une semaine après, nous avons procédé au démariage à 1 plant. De l'engrais NPK (15/15/15) a été apporté en deux tranches à la dose de 150 kg/ha. Appliquée en deux fractions, une au démariage, et une autre à la montaison, de l'urée (46 %) a été apportée à la dose de 20 kg à chacune des fractions. Une irrigation d'appoint de 20 m³ minimum par semaine est apportée, pour plus de 7 jours consécutifs sans pluie ou quand les pluies enregistrées sont en dessous de 20 m³. Par ailleurs, l'analyse de la figure 2 ci-mentionnée justifie nos arrosages. Le contrôle des mauvaises herbes a été effectué à travers des sarclages à la houe. Pour le contrôle des nuisibles, nous avons appliqué des traitements insecticides (avec du malathion) à une dose de 500 EC (soit 500 ml de produit dilué dans 32 l d'eau) pour chaque traitement. Deux traitements au total, respectivement au 60^{ème} et 70^{ème} jour après semis ont été effectués. Des surveillances contre les attaques d'oiseaux ont été également menées. De manière générale, les plantes ont été mises dans « des conditions optimales » afin d'éviter tout type de stress.



Photo 1 : Conduite de l'essai (Crédits photos Adama Faye, Katina OLODO et Aby Cissé)

2.2. Paramètres étudiés

Afin de caractériser l'évolution agro-morphologique des variétés entre 1970 et 2016, nous avons décrit **11** paramètres agronomiques, dont **1** qualitatif et **10** quantitatifs.

Toutes les mesures ont été effectuées sur le brin maître de chaque plant, avec quelques fois sur le brin secondaire lorsque le brin maître est cassé.

➤ Date de la première épiaison

La date de la première épiaison sur le brin maître a été relevée durant la culture et s'est matérialisée par la première sortie d'épi visible (Photo 1/A). Les observations pour ce trait ont été menées tous les jours, sur toutes les lignes et sur tous les blocs pour identifier les plants ayant éventuellement épiés.

➤ Présence d'aristation

L'aristation est un caractère qu'on retrouve particulièrement chez le mil « sauvage » et qui se matérialise par la présence d'une structure semblable à des épines très fines au niveau de l'épi. Elle est généralement spécifique aux sanio (variétés tardives). Comme pour les épines, elle assurerait une fonction de protection des grains de l'épi contre les oiseaux ou autres ravageurs. La présence d'aristation fut le caractère qualitatif évalué.

➤ Comptages des talles

Les premiers caractères quantitatifs évalués à la maturité ont concerné le comptage du nombre de talles fertiles (présence d'épis) et du nombre de talles stériles (absence d'épis). Le ratio du nombre de talles fertiles sur le nombre total de talles a été analysé sous la variable « fertilité ».

➤ Longueur du brin

A l'aide d'un sécateur, nous avons récolté le brin maître. Coupé au sol, le brin a été étalé par terre et sa longueur mesurée en centimètre jusqu'au sommet de l'épi à l'aide d'un décimètre.

➤ Diamètre du brin

Placé au milieu du premier entre-nœud, nous avons mesuré la circonférence du brin à l'aide d'un ruban-mètre. Le diamètre a été déterminé à partir de cette circonférence grâce à la

formule suivante: $\text{Diamètre(cm)} = \frac{\text{Circonférence}}{3.14}$

➤ Longueur de l'épi

A l'aide d'un décimètre, nous avons mesuré la longueur de l'épi (de la base de grainaison jusqu'à la pointe de l'épi).

➤ Diamètre de l'épi

Il a été déterminé à partir de la circonférence, mesurée à partir du milieu de l'épi à l'aide de ruban-mètre, selon la formule $\text{Diamètre(cm)} = \frac{\text{Circonférence}}{3.14}$

L'épi détaché du brin a été par la suite mis dans le sac portant les renseignements de l'accession concerné. Cette procédure a été la même pour chaque individu, ligne après ligne, sur tous les blocs.

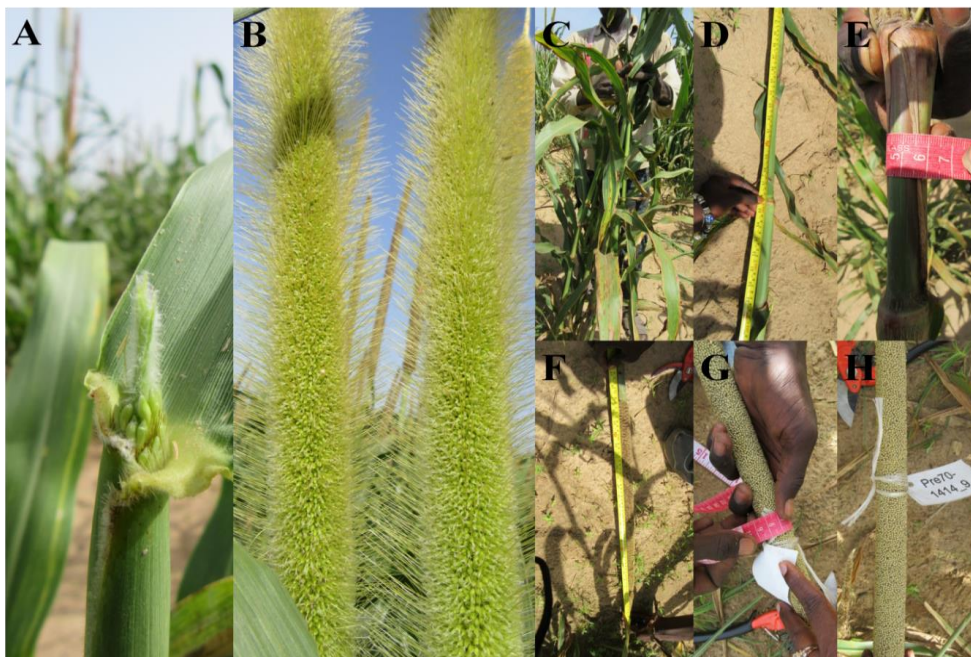


Photo 2 : Paramètres observés et ceux mesurés pendant la culture et au moment de la récolte : **A)** Epiaison. **B)** Présence d'aristation. **C)** Comptage de talles. **D)** Longueur du brin. **E)** Circonférence du brin. **F)** Longueur de l'épi. **G)** Circonférence de l'épi. **H)** Epi identifié pour le battage. Les sacs récoltés ont été placés dans un séchoir à l'air libre une semaine environ avant leur mise au four pendant 4 jours. (Crédits photos Aby Cissé)

➤ Poids de l'épi (épi avec grains)

A l'aide d'une balance électrique, nous avons pesé les épis pour chaque accession, individu par individu.

➤ Poids des grains

Après un battage manuel, séparément dans des sacs en tissu, suivi d'un vannage, les grains obtenus ont été placés dans des sacs en plastique, où à l'intérieur de chacun d'eux se trouvait l'étiquette de l'individu concerné. Nous avons par la suite pesé le poids des grains pour chaque individu à l'aide d'une balance de précision.

➤ Poids de 1000 grains

La mesure du poids de 1000 grains a constitué le dernier paramètre évalué. Il s'agissait de compter 1000 grains à l'aide d'une machine à 1000 grains (« le Numigral »), pour chaque individu et de les peser par la suite. Tous les poids ont été mesurés en gramme.



Photo 3 : Opérations post récolte (crédits photos Aby Cissé)

2.3. Analyse des données

Pour caractériser les variations agro-morphologiques entre les échantillons de 1970 et ceux de 2016, nous avons utilisé le tableur Excel pour l'enregistrement des données récoltées au champ. Les analyses statistiques ont été réalisées avec le logiciel R (R development core team) et les packages suivants : *ade4* (Dray et Dufour, 2007), *lme4* (Bates et *al.*, 2015), *ggplot2* (Wickham, 2009) et *metap* (Dewey, 2017).

Nous avons d'abord réalisé une analyse en composantes principales (ACP) pour essayer de mettre en évidence des regroupements potentiels. Puis, en vue d'évaluer les effets des différents facteurs sur l'expression des variables, nous avons testé 3 modèles linéaires en considérant les effets année, site et bloc.

$$\text{Modèle 1 : } y_{hjk} = m + a_h * b_j + e_{hjk}$$

$$\text{Modèle 2 : } y_{ihjk} = m + s_i * a_h + s_i * b_j + a_h * b_j + e_{ihjk}$$

$$\text{Modèle 3 : } y_{ihjk} = m + s_i + s_i / a_i + b_j + e_{ihjk}$$

y étant la variable étudiée, m la moyenne totale, a_i l'effet année (1970 vs 2016), b_j l'effet bloc, s_i l'effet site et les interactions (*). Pour le modèle 3, nous avons testé l'effet année emboîté dans l'effet site. Pour chaque modèle, nous avons testé la normalité des résidus avec un Shapiro test (Royston, 1995). Les modèles ont été comparés selon les critères d'AIC (Burnham et Anderson, 2002) et de BIC (Gideon, 1978). Un modèle avec un AIC inférieur signifie qu'il s'agit d'un meilleur modèle pour expliquer les variations qu'un modèle avec un AIC plus élevé. L'interprétation sera la même avec le BIC. Dans la plupart des cas la normalité n'a pas été entièrement atteinte pour nos modèles. Nous avons donc réalisé des tests non-paramétriques et avons testé les effets blocs en utilisant un test de Kruskal-Wallis et l'effet année en comparant les moyennes des sites entre 1970 et 2016 via un test de Wilcoxon pour échantillons appariés puis les p-values des tests dans chaque bloc ont été combinées avec la méthode de Fischer pour estimer la p-value globale. Le seuil de significativité $\alpha = 5\%$ a été appliqué à l'ensemble des tests effectués.

CHAPITRE III

RESULTATS

III. RESULTATS

Avant de procéder à l'analyse des données, nous soulignons que face à des attaques notées dans nos parcelles de culture et qui ont occasionné des avortements et des pertes de grains, les variables poids de l'épi du brin maitre et poids des grains ont été exclus des analyses à venir, par souci de fiabilité des résultats. Par ailleurs, nous avons constaté deux erreurs d'étiquetage pour les sites 1525 et 1477 des années 1970 qui, à priori considérés souna, se sont comportés comme des sanio. Par conséquent, sous réserve d'une analyse génétique pour vérifier s'il s'agit effectivement de variétés souna ou de variétés sanio, nous avons éliminé ces sites dans les analyses. Egalement, du fait que leurs comportements soient différents, les variétés de mil souna et sanio utilisées doivent être traitées séparément. Par ailleurs, compte tenu du faible nombre de sites (2 au total) de collectes de sanio dans cette étude, nous allons, dans les analyses qui requièrent une séparation des deux groupes variétaux, étudier uniquement le comportement des souna au cours du temps (donc pour 12 sites).

1. Analyses descriptives

1.1. Caractéristiques des paramètres agro-morphologiques testés chez les variétés paysannes de mil au cours du temps

Les données moyennes par périodes, collectées sous les différentes variables étudiées à partir des sites d'échantillonnage, sont consignées dans le tableau 2 suivant.

Tableau 2 : Moyennes et écarts type des variétés de mil testées entre 1970 et 2016 sous 7 variables quantitatives et pourcentage d'aristation pour les deux périodes

Variété	Année	Epiaison (jours)	Longueur brin (cm)	Diamètre brin (cm)	Longueur épi (cm)	Diamètre épi (cm)	Fertilité (ratio)	Poids1000 grains (g)	Aristation (%)
Souna	1970	48±4	228±31	1,6±0,3	53,8±12,3	2,3±0,4	0,6±0,2	7,3±1,5	12,2
	2016	48±4	219±32	1,5±0,3	51,2±15,6	2,3±0,4	0,6±0,2	7,3±1,4	3
Sanio	1970	70±6	250±34	1,5±0,2	38,6±8,2	2,3±0,3	0,6±0,2	6,0 ±1,3	67,6
	2016	70±7	240±35	1,4±0,2	42±7,6	2,4±0,4	0,6±0,2	6,1±1,3	91,4

1.2. Corrélations entre les différentes variables testées

Nous avons voulu déterminer dans quelles mesures les variables étudiées pouvaient être corrélées. A cet effet, la matrice de corrélation obtenue montre des corrélations assez importantes entre les couples de variables (tableau 3). Les corrélations les plus élevées sont observées entre les mesures de brin et d'épi, d'une part entre leur diamètre (0,593) et leur longueur (0,421), d'autre part entre le diamètre du brin et la longueur de l'épi (0,513). Le diamètre de l'épi est le plus significativement corrélé et négativement à la fertilité (-0,321). Le poids de 1000 grains est corrélé le plus à la longueur de l'épi (0,415). L'épiaison est corrélée le plus et négativement au poids de 1000 grains (P1000 : -0,299).

Tableau 3 : Matrice de corrélation entre les variables mesurées pour les groupes variétaux souna et sanio

	Epiaison	Longueur brin	Diamètre brin	Fertilité	Longueur épi	Diamètre épi	P1000
Epiaison							
Longueur brin	0,124						
Diamètre brin	0,028	0,381					
Fertilité	-0,164	0,033	-0,209				
Longueur épi	-0,211	0,421	0,513	-0,233			
Diamètre épi	0,128	0,194	0,593	-0,321	0,396		
P1000	-0,299	0,193	0,315	-0,144	0,415	0,313	

Les valeurs en gras indiquent les corrélations significatives pour chaque variable

1.3. Analyse en composantes principales

Nous avons réalisé une première analyse en composantes principales (ACP) en considérant les deux groupes variétaux (figure 4). Les trois premiers axes de cet ACP expliquent plus de 71% de l'inertie (tableau 4) et semblent différencier les deux groupes : tardif (sanio) et précoce (souna). Les axes 1 et 2 représentent mieux cette distinction. Cette différenciation reste quand même très faible, ceci étant sûrement lié aux nombres limités d'accessions de sanio (4). Les variables contribuant le plus à l'axe 1 et 2 sont le diamètre du brin, la longueur de l'épi, le diamètre de l'épi (axe 1) et l'épiaison, le poids des 1000 grains (axe 2). La longueur du brin et la fertilité participent le plus à la construction de l'axe 3 (tableau 5).

Tableau 4 : Pourcentages de variations exprimées par les différents axes testés sur l'ACP des deux groupes variétaux (souna et sanio)

	Axe 1	Axe 2	Axe 3	Axe 4	Axe 5
Projection d'inertie (%)	37,627	19,163	15,129	9,714	8,295
% cumulé	37,63	56,79	71,92	81,63	89,93

Tableau 5 : Contribution des variables sur les trois axes retenus (en %) pour les deux groupes variétaux

	Axe1	Axe2	Axe3
Epiaison	3,7	76,7	-21,3
Longueur brin	33,1	4,1	69,6
Diamètre brin	49,7	11	10,7
Fertilité	24,4	36,8	61,7
Longueur épi	48,6	19,7	6,5
Diamètre épi	45,4	25,4	17,7
P1000	37,4	39,9	20,5

Les valeurs en gras indiquent les valeurs maximales pour chaque colonne.

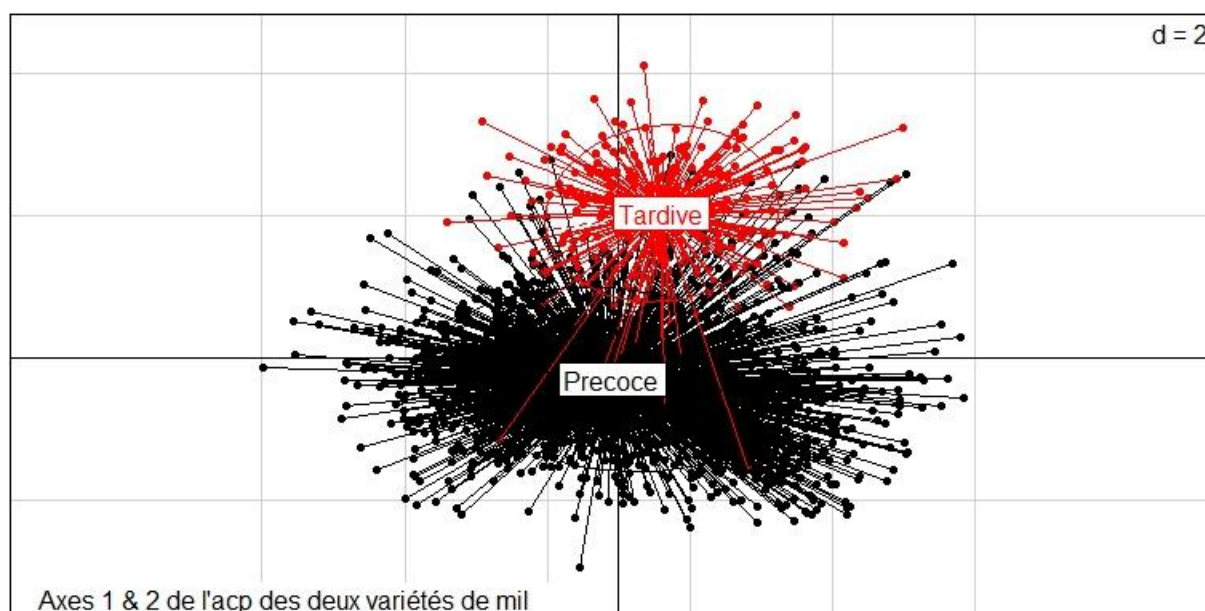


Figure 4 : Analyse en composantes principales des deux groupes variétaux de mil sur les axes 1 et 2

Lorsque nous réalisons l'ACP uniquement pour le mil précoce, les trois premiers axes expliquent 72,6 % de l'inertie (tableau 6). L'examen des contributions des variables (tableau 7) montre que les variables diamètre du brin, longueur de l'épi et le diamètre de l'épi concourent le plus à la formation du premier axe. Cet axe peut donc être défini comme l'axe du rendement et du développement végétatif. L'axe 2 définit les variables épiaison et fertilité. Cet axe peut être décrit comme l'axe de la précocité et intègre également le rendement. L'axe 3 regroupant plus la longueur du brin et le poids de 1000 grains, apporte une information complémentaire à l'axe 1. La structuration de l'ACP (figure 5) fait apparaître une juxtaposition des variétés de 1970 et celles de 2016. Par conséquent, il semblerait qu'il n'y ait pas une différenciation marquée entre les variétés de 1970 et celles de 2016, ce qui semble souligner une forte variabilité entre les variétés au sein d'une même année. De plus, l'ACP ne permet pas de montrer des groupes distincts entre les sites utilisés pour les deux années confondues (figure 6). Nous pouvons donc supposer une forte variabilité intra-année et intra-site.

Tableau 6 : Pourcentages de variations exprimées par les différents axes testés sur l'ACP des souna

	Axe 1	Axe 2	Axe 3	Axe 4	Axe 5
Projection d'inertie (%)	39,69	20,818	11,914	9,826	7,298
% cumulé	39,87	60,69	72,6	82,43	89,73

Tableau 7 : Contribution des variables sur les trois axes retenus (en %) pour le souna

	Axe1	Axe2	Axe3
Epiaison	1,78	42,8	14,4
Longueur brin	12	15,3	31,1
Diamètre brin	23,5	0	0,5
Fertilité	7,2	29,8	4,1
Longueur épi	22,6	2,5	5,7
Diamètre épi	20,7	2,5	7,8
P1000	12,2	7,2	36,4

Les valeurs en gras indiquent les valeurs maximales pour chaque colonne.

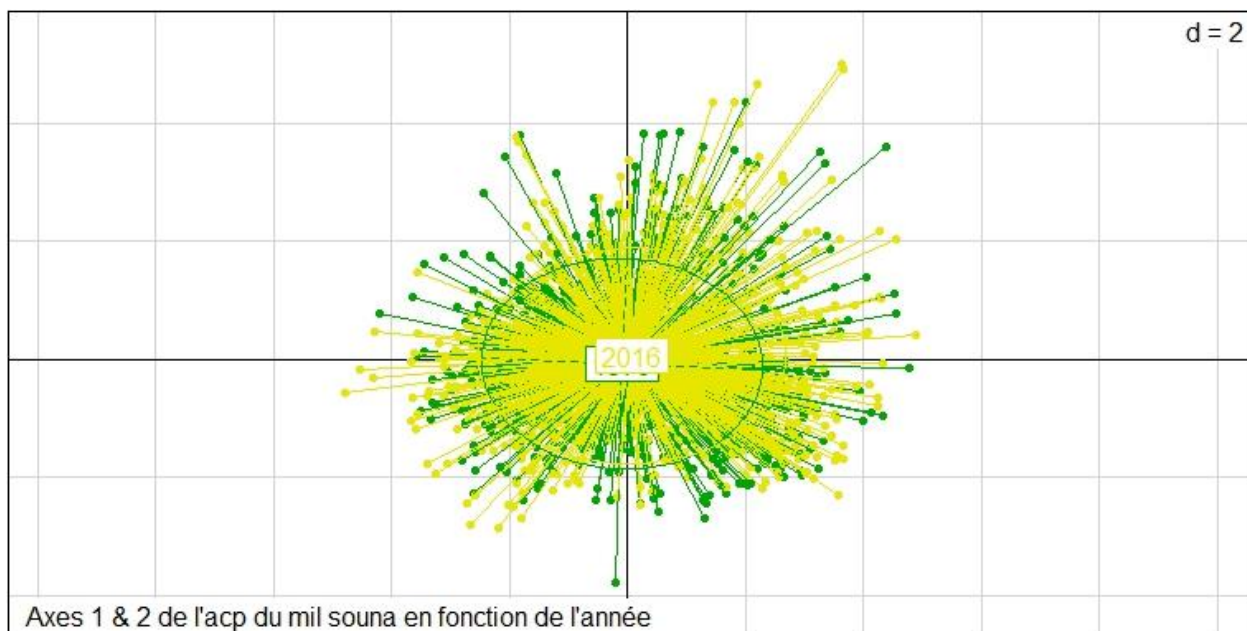


Figure 5 : Analyse en composantes principales du profil des variétés souna de 1970 et celles de 2016 sur les axes 1 et 2

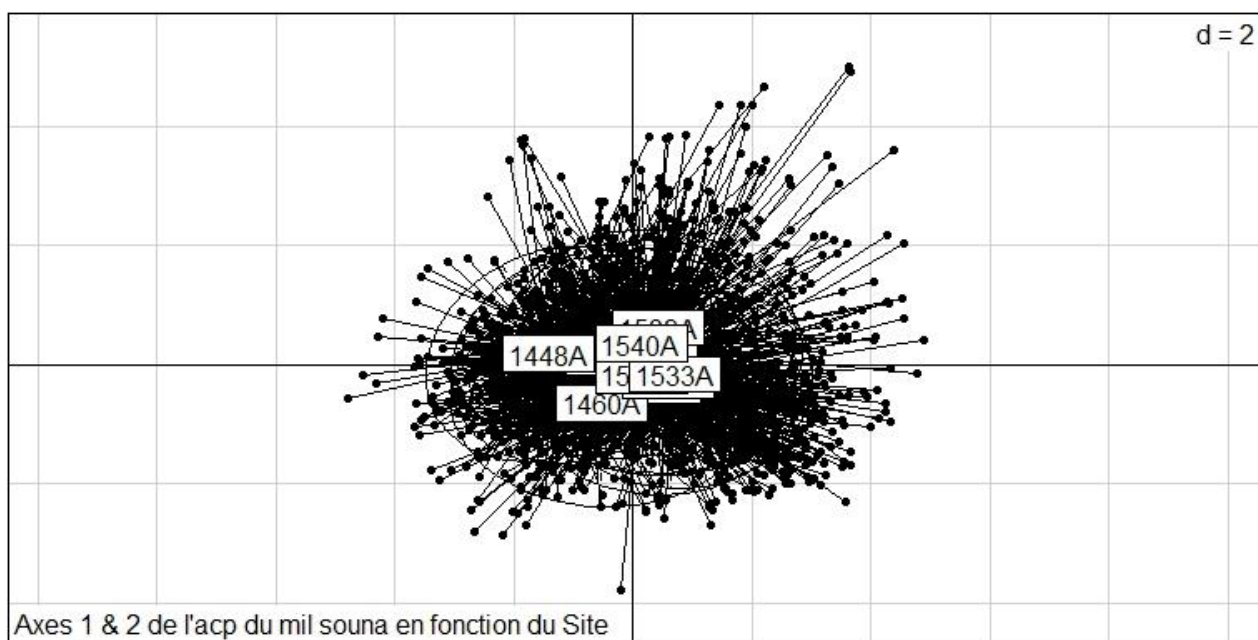


Figure 6 : Analyse en composantes principales sur 12 sites de collecte souna avec les axes 1 et 2

2. Variabilité agro-morphologiques des variétés souna testées entre 1970 et 2016

2.1. Effet de l'année sur l'épiaison

La figure 7 ci-dessous donne la variation de la date d'épiaison des accessions utilisées entre 1970 et 2016. Ce graphique montre un léger raccourcissement du cycle pour 6 sites (1448, 1455, 1490, 1522, 1539 et 1540) et une augmentation du nombre de jours avant épiaison pour les sites 1414, 1417, 1495, 1501 et 1533.

D'autre part, la représentation en bloc pour les deux périodes (figure 8) semble indiquer des variations dans les réponses des variétés en fonction des blocs. Ces variations apparaissent plus marquées chez les variétés en 1970.

Nous avons testé 3 modèles linéaires pour tenter d'identifier les effets des différents facteurs. Les résultats des modèles 2 et 3, assez proches ont paru meilleurs (Tableau 8, figure 9). Nous n'avons atteint la normalité des résidus pour aucun des modèles. Néanmoins le modèle 2 a permis d'observer un effet site ($p < 2,2e-16$), par contre il n'a pas montré un effet année seul ($p = 0,616$) mais un effet de l'année en terme d'interactions avec le facteur bloc et le facteur site ($p = 0,0095$; $p < 2,2e-16$, respectivement). Avec le modèle 3, nous avons observé un effet année emboité dans l'effet site ($p < 2,2e-16$) et la disparition de l'effet bloc ($p = 0,091$). Pour le modèle 1, le R^2 ajusté est très faible sans compter que nous n'avons pas atteint la normalité des résidus pour celui-ci et pour les deux autres par ailleurs.

Nous avons donc réalisé des tests non-paramétriques. Le test de Kruskal-wallis par année a mis en évidence un effet bloc et que cet effet portait sur les variétés de 1970 ($p = 0,0005$).

Pour aucun des blocs nous n'avons observé un effet année (test de Wilcoxon), ce qui nous a conduit à une probabilité de valeur non significative pour le test de Fischer combiné ($p = 0,527$). La durée moyenne du cycle semis-épiaison est restée inchangée au cours du temps (48 j).

En résumé, nous pouvons dire qu'il ne semble pas y avoir d'effet temporel clair sur l'épiaison. Il semble être masqué par la forte variabilité entre les sites (effet emboité significatif).

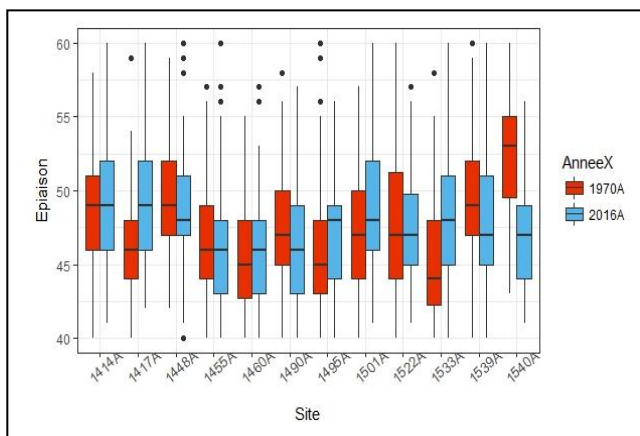


Figure 7 : Epiasion par années selon les sites

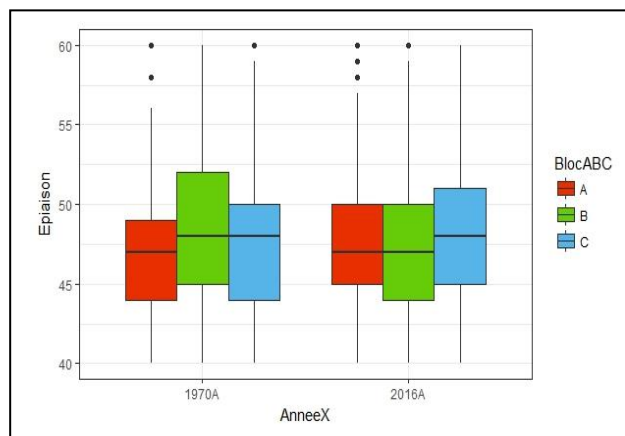


Figure 8 : Epiasion par année selon les blocs

Tableau 8 : Modèles linéaires testés sur l'épiasion avec la p-value du Shapiro test des résidus des modèles, les valeurs de R² ajusté, d'AIC et de BIC

Modèles testés	Shapiro Test	R ² ajusté	AIC	BIC
M1= $\text{lm}(1/\text{Epiasion} \sim \text{Annee} * \text{Bloc}, \text{data}=\text{souna2})$	1,61e-08	0,006	-16980	-16942
M2= $\text{lm}(1/\text{Epiasion} \sim \text{Annee} * \text{Site} * \text{Bloc}, \text{data}=\text{souna2})$	0,002	0,148	-17184	-16785
M3= $\text{lm}(1/\text{Epiasion} \sim \text{Site} + \text{Site}/\text{Annee} + \text{Bloc}, \text{data}=\text{souna2})$	0,001	0,118	-17168	-17020

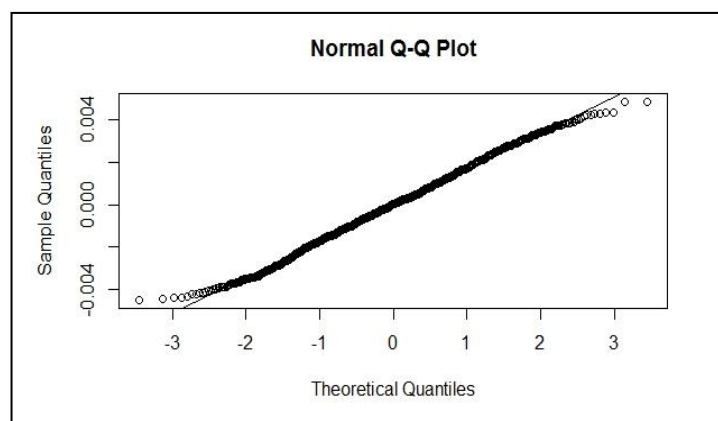


Figure 9 : Valeurs théoriques versus valeurs observées de l'épiasion/Modèle2

2.2. Effet de l'année sur la longueur du brin maitre

La figure 10 présente la variation de la longueur du brin maitre dans les différents sites, selon les années. Nous constatons que pour tous les sites à l'exception des sites 1460, 1501 et 1522 la longueur du brin maitre a diminuée entre 1970 et 2016.

Les box-plots des blocs selon les deux périodes (figure 11) montrent que les valeurs médianes des 3 blocs, assez proches au sein de chaque année, sont plus petites en 2016 comparé à la période de 1970. Mais dans tous les cas, les réponses différentes apportées par chaque bloc semblent traduire une sensibilité de la longueur des brins aux conditions de l'expérimentation.

Pour tester l'effet des facteurs et de leurs interactions pour ce caractère, nous avons utilisé des modèles de régressions linéaires (tableau 9, figure 12). En considérant le modèle 2, nous avons observé un effet significatif pour les trois facteurs : année, site et bloc ($p = 3,80e-11$; $p < 2,2e-16$; $p = 2,86e-10$, respectivement). Les mêmes observations peuvent être tenues pour le modèle 3. Pour les modèles 1 et 2, la normalité des résidus est atteinte ($p = 0,396$ et $p = 0,059$, respectivement), avec cependant un meilleur R^2 ajusté pour le modèle 2.

Nous avons tout de même réalisé des tests non-paramétriques. Par-là, nous avons observé un effet bloc significatif (Kruskal-Wallis $p = 1,396691e-11$).

Le test de Wilcoxon apparié pour chaque bloc a montré un effet significatif uniquement pour le bloc B ($p = 0,021$). Néanmoins le test combiné de Fischer sur les trois (3) blocs a abouti à une différence significative de la longueur du brin maitre entre 1970 et 2016 ($p = 0,033$).

Au cours des années, les longueurs moyennes de brins des variétés souna de 1970 sont passées de 228 cm à 219 cm en 2016.

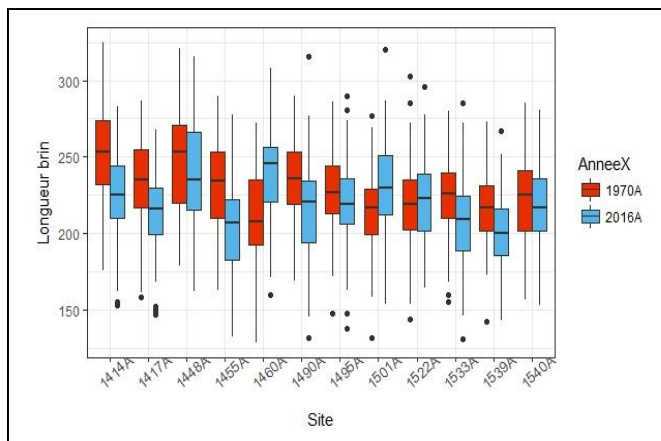


Figure 10 : Longueur brin par année selon les sites

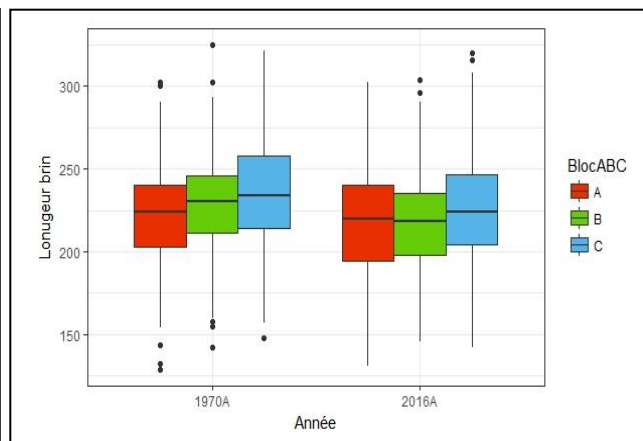


Figure 11 : Longueur brin par année et par bloc

Tableau 9 : Modèles linéaires testés sur la longueur du brin avec la p-value du Shapiro test des résidus des modèles, les valeurs R^2 ajusté, d'AIC et de BIC

Modèles testés	Shapiro Test	R^2 ajusté	AIC	BIC
M1=lm(Longbrin~Annee*Bloc, data=souna2)	0,396	0,037	18027	18066
M2=lm(Longbrin~Annee*Site*Bloc, data=souna2)	0,059	0,199	17749	18152
M3=lm(Longbrin~Site+Site/Annee+Bloc, data=souna2)	0,004	0,179	17749	17898

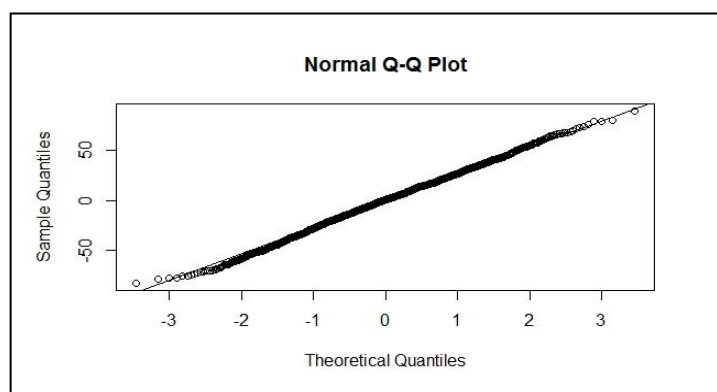


Figure 12 : Valeurs théoriques versus valeurs observées de la longueur brin/ modèles 2

2.3. Effet de l'année sur le diamètre du brin maitre

La figure 13 présente le diamètre du brin maitre de chaque site suivant les années. Nous observons une forte variabilité entre les sites, avec néanmoins une tendance, soit à la baisse, soit à la hausse, assez marquée pour les sites 1417, 1455, 1522, 1539 et 1540.

Si nous considérons la représentation en bloc des deux périodes (figure 14), nous observons les mêmes réponses, aussi bien chez les variétés de 1970 que chez celles de 2016 suivant les blocs. Néanmoins, il semblerait qu'il y ait un effet du champ expérimental sur le comportement des variétés, traduit par les différences notées dans les réponses au niveau des blocs.

L'analyse des trois modèles linéaires, comme pour les mesures précédentes a discriminé deux modèles (tableau 10). Pour le modèle 2, nous avons obtenu un effet significatif du facteur site ($p < 2,2e-16$) et du facteur bloc ($p < 2,2e-16$). L'effet du facteur année n'a été significative que dans son interaction avec le facteur site ($p = 3,898e-09$). Pour le modèle 3, nous avons observé les mêmes effets site et bloc ainsi qu'un effet de l'année emboité dans l'effet site ($p = 1,305e-08$). Cependant, pour aucun des modèles, nous n'avons atteint la normalité.

Nous avons donc appliqué des tests non-paramétriques. L'effet bloc est validé par le test de Kruskal-Wallis ($p = 1,118724e-30$).

L'analyse par bloc de l'effet année n'a été significative pour aucun des blocs, ce qui a abouti à un test de Fischer combiné non-significatif pour le caractère diamètre du brin entre les variétés de 1970 et celles de 2016 ($p = 0,640$). En résumé, il semblerait qu'il n'y ait pas de différence temporelle pour ce caractère ou que celle-ci, du fait de sa faible valeur, soit masquée par l'effet site. Le diamètre moyen des variétés en 1970 de l'ordre de 1,6 cm n'a diminué que de 0,1 cm en 2016.

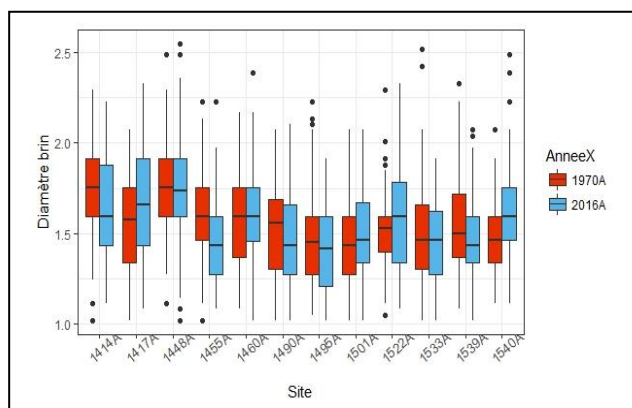


Figure 13 : Diamètre brin par année selon les sites

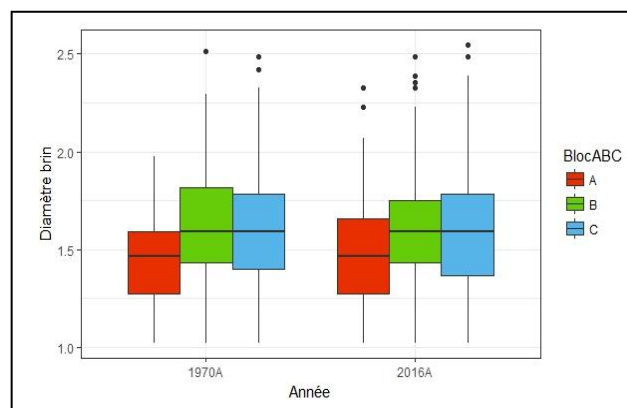


Figure 14 : Diamètre brin par année et par bloc

Tableau 10 : Modèles linéaires testés sur le diamètre du brin avec la p-value du Shapiro test des résidus des modèles, les valeurs de R^2 ajusté, d'AIC et de BIC

Modèles testés	Shapiro test	R^2 ajusté	AIC	BIC
M1=lm(Diambrin~Annee*Bloc, data=souna2)	2,9e-09	0,046	374	413
M2=lm(Diambrin~Annee*Site*Bloc, data=souna2)	2,297e-05	0,193	136	538
M3=lm(Diambrin~Site+Site/Annee+Bloc, data=souna2)	0,0001	0,154	176	325

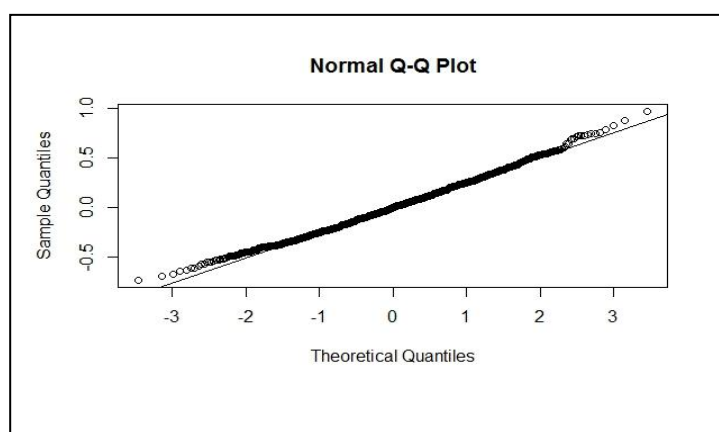


Figure 15 : Valeurs théoriques versus valeurs observées du diamètre brin/ modèles 3

2.4. Effet de l'année sur la fertilité

L'évolution de la fertilité chez les variétés paysannes de mil, au cours des années et selon les sites, est représentée par la figure 16. Il est possible d'observer une baisse de la fertilité au cours du temps pour les sites 1414, 1417, 1448, 1495, 1501 et 1540. En revanche, pour les sites 1455, 1490, 1522, 1533 et 1539, les variétés apparaissent plus fertiles en 2016 comparées à 1970.

En considérant les box-plots par bloc pour les deux années (figure 17), il semblerait qu'il y ait un effet du champ expérimental sur l'expression de la fertilité des variétés ; ceci étant valable quelle que soit l'année.

L'analyse des trois modèles linéaires comme pour les précédentes mesures a indiqué que les modèles 2 et 3 étaient meilleurs, bien qu'ils aient été loin de la normalité. Le modèle 2 a montré un effet pour chaque facteur testé ainsi qu'un effet de leurs interactions (année $p = 0,002$; site $p < 2,2e-16$; bloc $p < 2,2e-16$; interaction site-année-bloc $p = 0,032$). Le modèle 3 n'a pas montré un effet année, mais un effet significatif du site ($p < 2,2e-16$) et un effet année emboîté dans l'effet site ($p = 3,774e-05$).

Les tests statistiques avec Kruskal-Wallis ont révélé un effet hautement significatif de l'effet bloc ($p = 3,194943e-26$); confirmant l'analyse sur les box-plots des blocs

Par contre, il n'y a pas d'effet année observé avec le test de Wilcoxon (Bloc A $p = 0,339$; bloc B $p = 0,266$; bloc C $p = 0,233$; Fischer combiné des trois blocs égal à 0,259). Le ratio entre le nombre de talles fertiles et le nombre total de talles a permis de constater que les variétés ont gardé le même niveau de fertilité au cours des années (0,6).

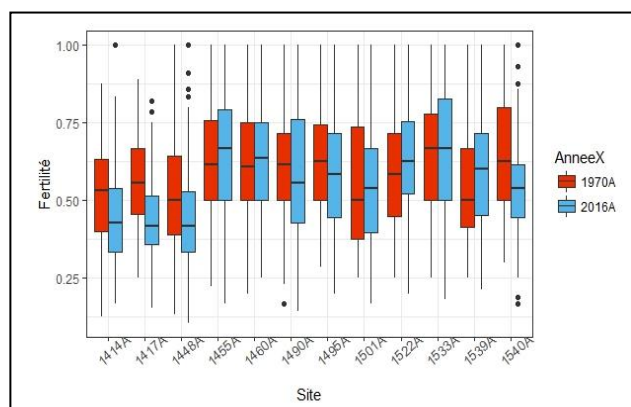


Figure 16 : Fertilités des sites au cours du temps

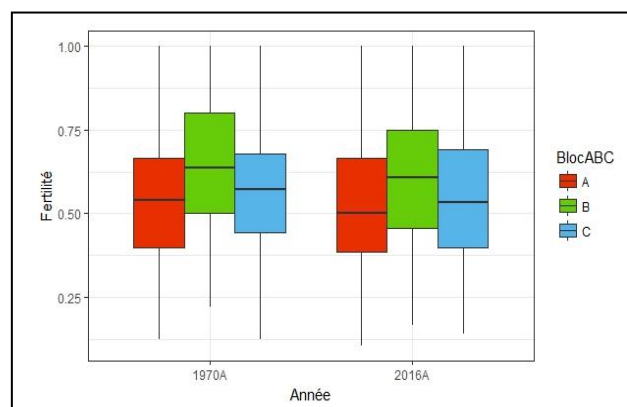


Figure 17 : Fertilité par année et par bloc

Tableau 11 : Modèles linéaires testés sur la fertilité avec la p-value du Shapiro test des résidus des modèles, les valeurs de R2, d'AIC et de BIC

Modèles testés	Shapiro test	R ² ajusté	AIC	BIC
M1=lm(Fertilité~ Année*Bloc, data=souna2)	6,90E-11	0,037	-809	-770
M2=lm(Fertilité~ Année*Site*Bloc, data=souna2)	9,70E-07	0,159	-999	-594
M3=lm(Fertilité~ Site+Site/Année+Bloc, data=souna2)	5,12E-07	0,123	-964	-814

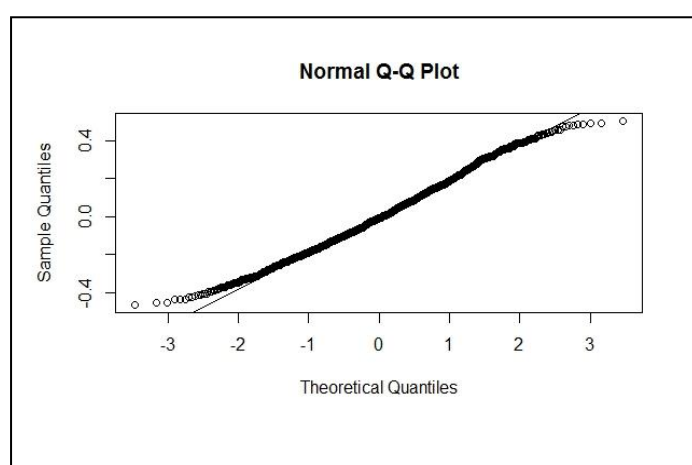


Figure 18 : Valeurs théoriques versus valeurs observées de la fertilité/Modèle

2.5. Effet de l'année sur la longueur de l'épi du brin maitre

La figure 19 présente les longueurs d'épis par année, selon les sites. Nous observons une forte variabilité selon les sites, avec néanmoins une tendance à la réduction des épis chez les variétés en 2016. En effet, nous voyons au niveau de cette figure que, pour 8 sites, la longueur de l'épi a diminué entre 1970 et 2016. Par contre pour 4 sites, dont 1(1448) très légèrement, la longueur de l'épi en 2016 a augmenté comparé à 1970.

La représentation en bloc des deux périodes (figure 20) montre des longueurs d'épis sensiblement égales selon les blocs et selon les années, soulignant potentiellement une absence d'effet du champ expérimental sur ce paramètre.

Deux parmi les trois modèles de régression linéaires testés ont permis d'atteindre la normalité (modèle 2 $p = 0,218$, modèle 3 $p = 0,301$), et ont par ailleurs présenté les meilleurs R^2 ajustés. Pour le modèle 2 nous avons observé un effet significatif pour le facteur site ($p < 2,2e-16$), le facteur année et son interaction avec le facteur site ($p = 1,153e-05$; $p < 2,2e-16$). Concernant le modèle 3, nous avons observé un effet du facteur site ($p < 2e-16$) ainsi qu'un effet année emboité dans l'effet site ($p < 2e-16$).

Le test non-paramétrique de Kruskal-Wallis n'a pas montré un effet bloc significatif ($p = 0,651$).

L'analyse par bloc de l'effet année sur la longueur de l'épi a montré qu'il était significatif avec le test de Fisher combiné ($p = 0,02$) même si l'effet observé sur un des blocs était non significatif. La longueur moyenne de l'épi des variétés est passée de 53,8 cm à 51,2 cm entre 1970 et 2016.

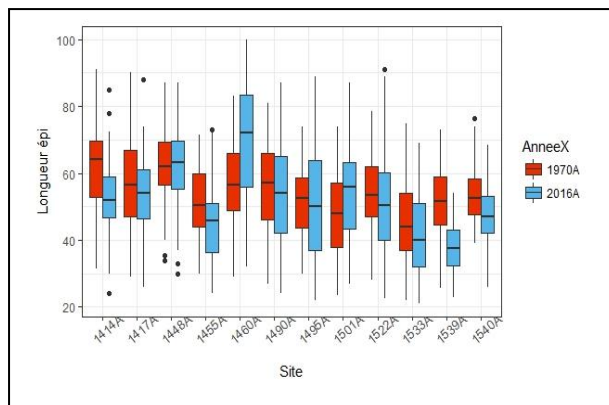


Figure 19 : Longueur d'épi des sites par année

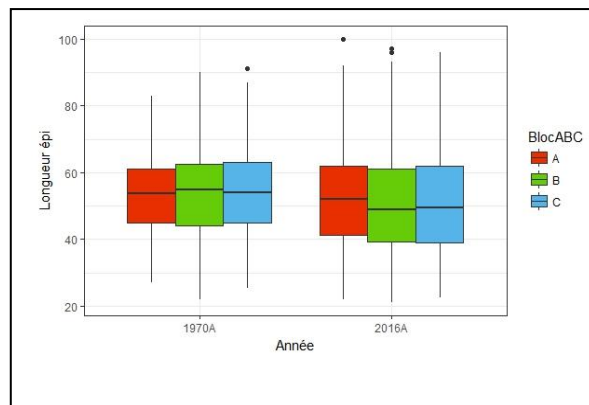


Figure 20 : Longueur d'épi par année et par bloc

Tableau 12 : Modèles linéaires testés sur la longueur de l'épi avec la p-value du Shapiro test des résidus des modèles, les valeurs de R^2 , d'AIC et de BIC

Modèles testés	Shapiro test	R^2 ajusté	AIC	BIC
M1=lm(Longepi ~Annee*Bloc, data=souna2)	3,514e-10	0,007	15192	15231
M2=lm(Longepi~Annee*Site*Bloc, data=souna2)	0,218	0,228	14786	15190
M3=lm(Longepi~Site+Site/Annee+Bloc, data=souna2)	0,301	0,231	14735	14884

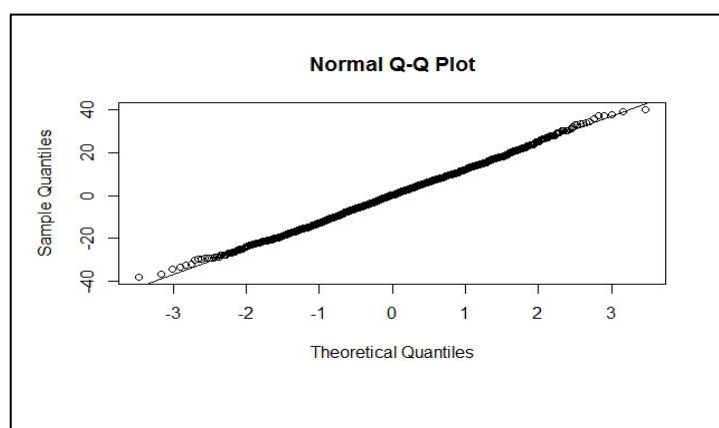


Figure 21 : Valeurs théoriques versus valeurs observées de la longueur d'épi/ modèles 3

2.6. Effet de l'année sur le diamètre de l'épi du brin maître

La figure 22 présente l'évolution du diamètre du brin des variétés au cours du temps. Elle montre 4 sites (1414, 1417, 1501 et 1540) pour lesquels le diamètre de l'épi a augmenté entre 1970 et 2016 et 7 sites (1455, 1460, 1490, 1495, 1522, 1533 et 1539) pour lesquels il y a eu une réduction du diamètre de l'épi au cours du temps.

Si nous observons les box-plots des blocs selon les périodes (figure 23), il n'apparaît pas de grandes variations dans les réponses selon les blocs, aussi bien chez les variétés en 1970 qu'en 2016. Ceci laisse supposer qu'il n'existe probablement pas d'effet bloc sur le diamètre de l'épi.

Pour aucun des 3 modèles linéaires testés nous n'avons atteint la normalité des résidus. Le modèle 2, bien que très proche de la significativité, n'a pas montré un effet du facteur année ($p = 0,051$). Cependant, nous avons noté un effet site ($p < 2,2e-16$) et un effet de son interaction avec l'année ($p < 2e-16$) très significatif. Le modèle 3 a mis en évidence un effet site ($p < 2e-16$) et un effet année emboîté dans l'effet site ($p < 2e-16$).

Les tests non paramétriques ont été non significatifs aussi bien pour l'effet bloc (Kruskal-Wallis $p = 0,872$) que pour l'effet année (bloc A $p = 0,301$; bloc B $p = 0,519$; bloc C $p = 0,470$; Fischer combiné $p = 0,515$). Le diamètre moyen des épis des variétés est resté le même au cours des deux périodes (2,3 cm).

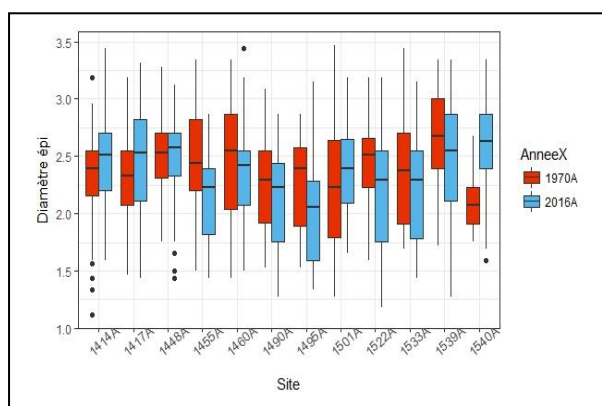


Figure 22 : Diamètre épi des sites par année

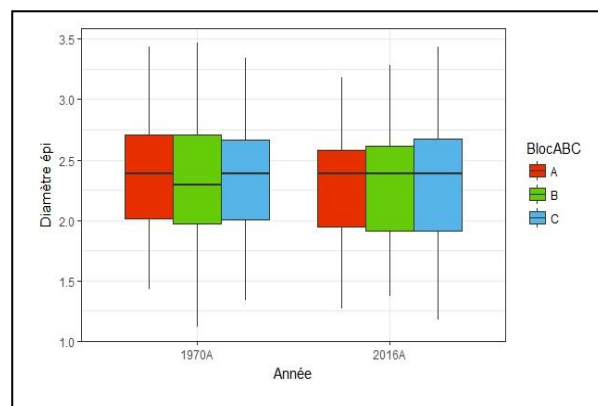


Figure 23 : Diamètre épi par année et par bloc

Tableau 13 : Modèles linéaires testés sur le diamètre de l'épi avec la p-value du Shapiro test des résidus des modèles, les valeurs de R2, d'AIC et de BIC

Modèles testés	Shapiro test	R ² ajusté	AIC	BIC
M1=lm(Diamépi ~Annee*Bloc, data=souna2)	2,922e-13	0,0002	2362	2401
M2=lm(Diamépi~Annee*Site*Bloc ,data=souna2)	8,144e-11	0,117	2194	2598
M3=lm(Diamépi~Site+Site/Annee+Bloc, data=souna2)	1,581e-11	0,115	2154	2304

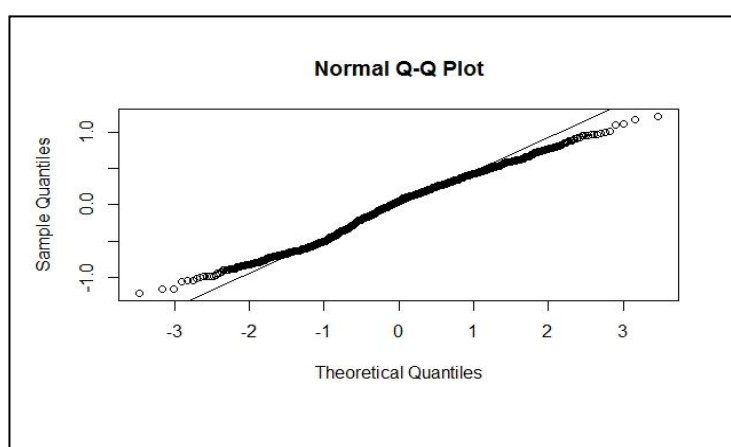


Figure 24 : Valeurs théoriques versus valeurs observées du diamètre épi/Modèle

2.7. Effet de l'année sur le poids de 1000 grains

Les valeurs du poids de 1000 grains pour chaque site au cours du temps sont représentées dans la figure 25. Il semble que pour les sites 1414, 1455, 1495, 1501, 1522 et 1533 le poids de 1000 grains a baissé entre 1970 et 2016. Par contre, pour le reste des sites, les poids des variétés de 2016 sont supérieurs à ceux des variétés de 1970.

Les poids de 1000 grains représentés par année et par bloc (figure 26) ne semblent pas être influencés par les conditions du champ expérimental chez les variétés en 2016, qui elles, présentent des valeurs sensiblement égales. Par contre, chez les variétés en 1970, les valeurs sont légèrement différentes selon les blocs; ce qui laisse supposer une sensibilité du poids de 1000 grains des variétés de 1970 à l'effet du champ expérimental.

Les trois modèles testés sur la variable poids de 1000 grains semblent assez similaires. Néanmoins, sont notés dans le modèle 2 un effet site et un effet de son interaction avec l'année ($p < 2,2e-16$; $p = 1,663e-06$). Le modèle 3, en plus d'un effet site, a montré un effet année emboîté dans l'effet site ($p = 2,666e-06$).

L'effet des blocs a été significatif avec le test de Kruskal-Wallis ($p = 0,0078$) et portait particulièrement sur les variétés de 1970 comme supposé avec l'analyse des box-plots des blocs ($p = 0,010$ pour les variétés en 1970 ; $p = 0,660$ pour les variétés en 2016).

L'année n'a pas eu d'effet sur le poids de 1000 grains avec la probabilité combinée de Fisher appliquée au test de Wilcoxon ($p = 0,578$), où $p = 0,424$ pour le bloc A ; $p = 0,301$ pour le bloc B ; $p = 0,733$ pour le bloc C. Le poids moyen de 1000 grains des variétés obtenu est le même quelle que soit l'année (7,3 g).

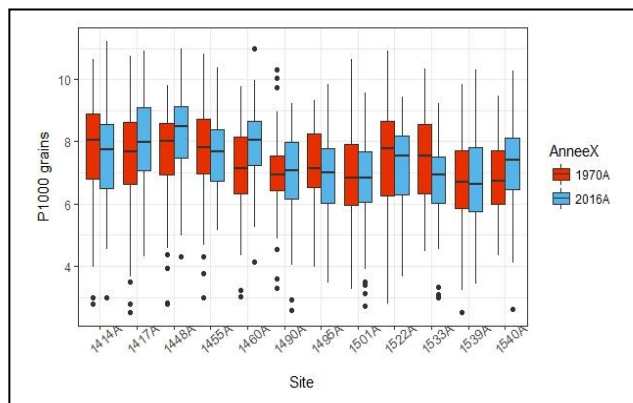


Figure 25 : Poids de 1000 grains des sites par année

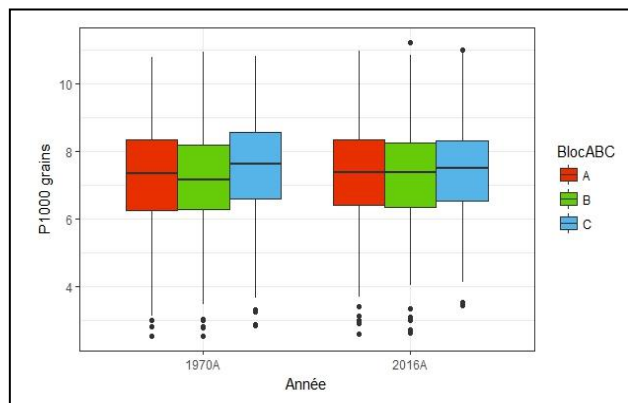


Figure 26 : Poids de 1000 grains par année et par bloc

Tableau 14 : Modèles linéaires testés sur le poids de 1000 grains, avec p-value du Shapiro test des résidus des modèles, les valeurs de R2, d'AIC et de BIC

Modèles testés	Shapiro test	R ² ajusté	AIC	BIC
M1=lm(P1000~Année*Bloc, data=souna2)	1,677e-09	0,004	6654	6692
M2=lm(P1000~Année*Site*Bloc, data=souna2)	1,623e-12	0,103	6526	6929
M3=lm(P1000~Site+Site/Année+Bloc, data=souna2)	7,909e-13	0,086	6514	6663

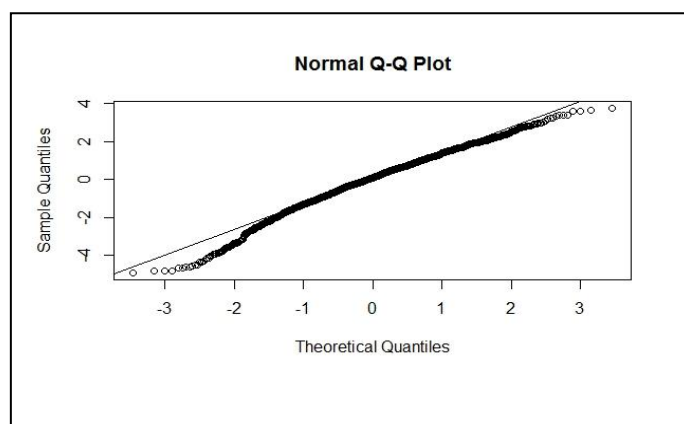


Figure 27 : Valeurs théoriques versus valeurs observées du poids de 1000 grains/Modèle 3

2.8. Synthèse des principaux résultats

Nous avons analysé 7 mesures agro-morphologiques quantitatives. Pour toutes les variables nous avons mis en évidence un effet site. Dans 5 cas sur 7, nous avons mis en évidence un effet bloc. Dans 3 cas seulement, pour la longueur du brin, la fertilité et la longueur de l'épi, nous avons démontré un effet très clair de l'année (modèle 2), mais seuls les effets de l'année sur les longueurs de brin et d'épi ont été validés par les tests non-paramétriques retenus. Pour les autres variables, nous avons observé un effet année emboité dans l'effet site (modèle 3) mais sans atteindre la normalité des résidus. Cet effet, étant masqué par la variabilité entre les sites, n'a pas été retrouvé par les tests non-paramétriques.

Le pourcentage moyen d'individus aristés au cours des deux périodes d'analyse a été de 12,2 % en 1970 et de 3 % en 2016 pour le souna ; soit une réduction moyenne de 9,2 %. Chez les sanio par contre, c'est l'effet inverse qui est observé. Avec 67,6 % d'individus aristés en 1970, le taux moyen d'aristation chez les variétés en 2016 a atteint 91,4 %.

Si nous analysons les souna, qui par ailleurs sont moins aristés par défaut ou même pas du tout, ces constats chez les variétés amènent à penser qu'au cours des années, cette faculté potentiellement acquise et qui leur conférait une certaine protection contre les pressions dues aux ravageurs, tend à se détériorer au cours du temps, probablement à cause de conditions défavorables à une expression de ce caractère.

D'autre part si nous regardons les sanio, qui sont par défaut aristés, on pourrait peut-être penser que :

- Entre 1970 et 2016, la fréquence de ce caractère et le polymorphisme associés ont augmenté en fréquence dans la population ; ou bien
- Ceci pourrait être dû à une augmentation des pressions parasitaires

Il reste tout de même plus judicieux de confirmer ces résultats avec plus d'échantillons de sanio collectés.

Pour voir dans quelles mesures l'origine géographique des variétés collectées pourrait impacter sur les différences observées dans les paramètres étudiés, nous avons calculé les

différences moyennes entre les deux périodes d'étude pour chaque site. Les résultats sont consignés dans le tableau 15.

Tout comme nous l'avons supposé avec les modèles linéaires testés, le tableau des différences moyennes observées entre 1970 et 2016 chez les variétés pour chaque paramètre (tableau 15) vient en appui au constat porté sur un éventuel effet de l'année masqué par l'effet site. En effet, pour les sites où on pourrait potentiellement avoir un effet de l'année masqué (*), les différences moyennes observées sont assez importantes.

Par ailleurs, si nous souhaitons observer dans quelles mesures la différenciation des réponses agro-morphologiques s'accordent avec les distances géographiques, nous pourrions supposer que du Nord vers le Sud, les différences seront caractéristiques du niveau d'aridité décroissant du Nord vers le Sud, c'est-à-dire qu'il existerait un gradient Nord-Sud dans les différenciations agro-morphologiques au cours des années. Or, le constat est qu'il n'apparaît pas de distinction régionale marquée dans les réponses du mil.

Il semble donc probablement qu'au Sénégal la divergence entre le Nord et le Sud, évidente du point de vue cycle de la pluviométrie, ne s'accompagne pas d'une différenciation importante dans les réponses du mil paysan au cours du temps, si nous considérons nos caractères étudiés.

Tableau 15 : Différence entre les années dans chaque site, * si effet année emboité significatif à au moins 5 %

Sites	Latitude (degré décimaux)	Longitude (degré décimaux)	Epiaison (jours)	Longueur brin (cm)	diamètre brin (cm)	Fertilité (ratio)	Longueur épi (cm)	Diamètre épi (cm)	Poids 1000 grains (cm)
1414	15,566667	-13,38333	+1	-27,7	-0,1*	-0,03	-10,4*	+0,1*	-0,2
1417	15,316667	-13,73333	+4*	-21,5	+0,1*	-0,1*	-4,2*	+0,2*	+0,5*
1448	15,55	13,283333	-1	-9,083	-0,05	-0,06*	-0,2	0,01	+0,7*
1455	15,26046	-14,71706	-1	-28,2	-0,2*	0	-7,3*	-0,3*	-0,06
1460	14,3	-16,6	-1	+29,7*	+0,01	0	+14,08*	-0,2*	+0,8*
1490	14,033333	-15,75	-1	-21,9	-0,09	-0,01	-2,4	-0,1	0,03
1501	14,15	-14,83333	+1*	+15,7*	+0,09	-0,01	+5,3*	0,1	-0,2
1533	14,266667	-12,76667	+3*	-17,02	-0,05	0	-4,3	-0,2*	-0,8*
1539	14,233333	-13,56667	-1	-12,04	-0,07	0,05	-12,8*	-0,1	0,04
1540	14,79087	-12,59538	-6*	-4,01*	+0,2*	-0,08*	-5,9*	+0,5*	+0,5*
1495	13,75	-15,93333	+2	-9,6	-0,1	-0,03	-2,2	-0,3*	-0,3
1522	13,81622	-14,43803	0	-4,3	+0,03	0,02	-2,05	-0,2*	-0,08

(+) signifie augmentation au cours des deux périodes ; (-) signifie diminution au cours des deux périodes

CHAPITRE IV

DISCUSSION

IV. DISCUSSION

1. Echantillonnage et relations inter-variables

En vue de la caractérisation de leur évolution, le choix des variétés, basé sur leur disponibilité dans les mêmes sites pour les deux années d'étude et leur taux de germination, permettait de minimiser l'impact des différences dans les procédures d'échantillonnage entre les deux collectes. Seules les accessions ayant germé au cours de tous les essais en serre ont été retenues. Chaque variété échantillonnée en 1970 a été comparée à la même variété échantillonnée en 2016. Les ACP réalisées sur les groupes variétaux de mil cultivé sont revenues sur deux groupes distincts. Les variétés précoces sont nettement discriminées des variétés tardives sur le critère d'épiaison, qui par ailleurs, apparaît comme le caractère qui permet la meilleure différenciation entre souna et sanio, ainsi que les critères de longueur de l'épi et de poids de 1000 grains. De là, nous rejoignons bien les résultats obtenus par Faye (2017) dans ses travaux de mémoire sur la caractérisation agro-morphologique du sanio et du souna au Sénégal. Par conséquent, ce qu'on a considéré comme du souna dans ce travail est bel et bien du souna. Cette différenciation entre souna et sanio, bien que faible, a été également observée dans d'autres travaux au Sénégal (Diack *et al.*, 2017).

On notera également, comme Faye (2017), qu'il y a une forte variabilité au sein de chaque groupe. De tels résultats sont également corroborés par les analyses génétiques qui montrent une forte diversité chez le mil du fait de son allogamie et des pratiques de gestion paysannes différentes (Bezançon, 2009 ; Hausmann, 2006).

2. Diversité agro-morphologique du mil au cours du temps

Les résultats de comparaison de nos échantillons n'ont montré de changements significatifs dans le phénotype des variétés que pour deux paramètres et les statistiques ont montré qu'ils étaient bien liés à l'effet de l'année.

2.1. Durée du cycle (semis-épiaison)

La variation de la longueur du cycle semis-épiaison sur plus de 40 ans ne s'est pas soldée par une diminution significative globale du nombre de jours. Ces résultats ne concordent pas aux scénarii récents qui suggèrent une précocité de la floraison chez des variétés cultivées ou même chez des progénitures sauvages pour échapper aux températures extrêmes ou à la sécheresse. Nous citons par là des études menées par Vigouroux *et al.* (2011) sur les caractères évolutifs des variétés locales de mil au Niger, sous l'effet de changements

climatiques. De même Williams et *al.* (2010) reviennent sur la précocité d'épiaison d'espèces forestières, en réponse à l'augmentation de l'aridité et à la hausse des températures aux Etats Unis. Nevo et *al.* (2011) les rejoignent avec leurs travaux sur l'évolution du blé et de l'orge sauvages, prospectée sur 28 ans en Israël. Menzel et *al.* (2000) nous en diront autant en revenant sur des évènements phénologiques d'arbustes en Europe entre 1951 et 1996.

Par ailleurs, nous n'avons pas pu montrer une sensibilité négative significative de nos variétés aux contraintes climatiques, exprimée à travers un rallongement de la date de floraison au cours des années. Sensibilité au réchauffement que certains auteurs ont découverte lors d'études portées sur de nombreuses espèces en Grande Bretagne (Fitter et *al.*, 1995; Sparks et *al.*, 2000).

Un effet des sites a été observé de même qu'un effet année emboité dans l'effet site. Par conséquent, il pourrait exister un effet année sur la floraison, mais que ce dernier soit masqué par la forte variabilité entre les sites. Ce qui semble rejoindre les travaux de Hausmann et *al.* (2006) qui annoncent une corrélation négative et significative entre la latitude et la floraison ; même si ce constat est réfuté par Stich et *al.* (2010) qui avancent une absence de corrélation entre le phénotype et les paramètres géographiques. Par ailleurs, Kodombo (2010), dans ses travaux de thèse portant sur la caractérisation inter-variétale du sorgho au Burkina Faso, a montré que les facteurs villages et zones agro-écologiques avaient une influence sur la durée du cycle des variétés qu'elle a testées. Par-là, il se pourrait que l'échantillonnage sur plusieurs sites différents soit un biais pour l'évaluation de l'évolution du mil au fil des années. Donc, pour des études ultérieures, il serait intéressant de comparer des échantillons des mêmes variétés dans les mêmes sites pour les deux années appariées. On ferait ainsi la comparaison au niveau chaque site et on pourrait voir concrètement ceux pour lesquels nous avons un effet de l'année sur les variables testées.

2.2. Développement végétatif

Des réductions significatives de la taille des plantes et de leurs épis ont été observées dans beaucoup d'études. Celles-ci apparaissent comme des réponses adaptatives potentielles face aux changements climatiques. De telles modifications morphologiques ont déjà été observées par Vigouroux et *al.* (2011) dans leurs travaux sur les évolutions du mil perlé au Niger. De même, Bonfils et *al.* (2013) ont annoncé une réduction de la taille chez de jeunes chênes, sous des conditions de sécheresse et de hausses de températures en Suisse.

Nos résultats ont montré une corrélation positive (0,421) entre la longueur du brin et la longueur de l'épi. Avec une diminution de la taille de la plante, une diminution de la taille de son épi apparaîtrait logique. Néanmoins nous ne pouvons écarter la possibilité que les modifications observées soient également le résultat d'une augmentation de flux de gènes avec la variété améliorée souna 3. Largement diffusé depuis plus de 30 ans au Sénégal, le souna 3 est caractérisé par un brin de 242 cm et un épi de 52 cm. La réduction de la longueur moyenne de l'épi chez nos variétés testées (passant de 53,8 cm en 1970 à 51,2 cm en 2016) pourrait s'expliquer par un flux de gènes avec le souna 3. Par contre, sachant que les variétés des années 70 avaient déjà une longueur de brin inférieure à celle du souna 3 ($228 < 242$), un éventuel flux de gènes avec le souna 3 n'aurait probablement pas pu entraîner une réduction de la taille des plantes. Dès lors, la possibilité qu'un éventuel flux de gènes puisse entraîner une réduction de la taille des brins de nos variétés est écartée.

Des mécanismes qui soutiendraient une adaptation chez les plantes cultivées face à la sécheresse ont été documentés. Beaucoup de caractères morphologiques et physiologiques qu'ils impliquent sont énoncés. L'ajustement osmotique ou encore la régulation stomatique apparaissent aujourd'hui comme des mécanismes majeurs d'adaptation à la sécheresse (Slama et al., 2005 ; Clavel et al., 2005). Ils permettent le maintien de nombreuses fonctions physiologiques, y compris la croissance. Toutefois, la régulation de la croissance de la partie aérienne de la plante est significativement affectée par la restriction hydrique (Bradford et Hsiao, 1982 ; Dib et al., 1992 ; Chartzoulakis et al., 1993 ; Zgallaï et al., 2007). Ces mécanismes de régulation servant à l'adaptation des plantes aux restrictions hydriques par une diminution de la surface transpirante justifieraient probablement une diminution de la taille de la plante et par ailleurs de son épi ; une caractéristique de l'épi que Dib et al. (1992) ont montré chez le blé comme mécanisme pour réduire les pertes en eau.

Par ailleurs, une réduction de la taille des plantes pourrait également être expliquée par une augmentation de la proportion de la masse souterraine (racines) en condition de stress hydrique (Winkel et Do, 1992). En effet, afin d'assurer l'approvisionnement en eau en condition de sécheresse, les plantes investissent plus d'énergie dans la formation des racines que dans le maintien de ses parties aériennes.

Cette combinaison de traits morpho-physiologiques susceptibles d'améliorer la résistance des plantes à la sécheresse a été reconnue chez le mil, mais le mode d'action et l'importance

effective dans la résistance à la sécheresse restent encore peu documentés (Winkel et Do, 1992). Ainsi nous pourrions penser que pour survivre face à une probable sécheresse, le mil paysan se focaliserait sur un meilleur développement racinaire pour puiser en profondeur et assurer une meilleure alimentation hydrique. Dès lors, il réduirait la croissance de son brin.

Nous assistons par-là à des phénomènes intégrant des processus essentiellement morphologiques, agissant à plus ou moins long terme et concourant à la plasticité de développement de l'appareil végétatif, et des processus physiologiques à court terme, tels que la fermeture partielle des stomates ou l'ajustement osmotique.

2.3. Rendement

De nombreux rapports et articles ont fait état de la réponse du rendement des cultures face aux changements climatiques (Knox et *al.*, 2012 ; Sultan et *al.*, 2015). Il est rapporté dans la littérature, qu'aussi bien l'augmentation des températures, mais surtout la diminution des précipitations, ont conduit à des déficits de production depuis les années 1970 en Afrique (Barrios et *al.*, 2008). Les études antérieures de ces auteurs prévoyaient déjà une réduction du rendement des cultures telles que le blé, le maïs, le mil ou encore le sorgho en Afrique.

Le poids des grains et celui des épis n'ont pas été pris en compte au cours de cette étude. Nous ne pouvons par conséquent juger concrètement le comportement des variétés, notamment leur productivité au cours du temps. Néanmoins, il est essentiel de souligner que les variables fertilité et poids de 1000 grains (celui-ci renseigne sur le volume des grains) sont restées inchangées au cours du temps. Par-là, si nous corrélons le rendement avec les variables fertilité et poids de 1000 grains, nos résultats ne rejoignent pas les constats mentionnés dans la littérature. Il est par là probable que les variétés paysannes de mil au Sénégal arrivent à supporter les effets des changements climatiques ou par ailleurs, que nos zones de collectes ne soient pas encore réellement touchées par des conditions extrêmes pouvant modifier le rendement des variétés paysannes cultivées.

Une autre façon d'appréhender les effets des changements climatiques sur le rendement est de faire le rapprochement entre le raccourcissement de la floraison et son effet sur le rendement. En effet, de nombreux travaux ont montré l'existence d'une relation positive entre la longueur du cycle et le rendement potentiel. Le recours à une stratégie d'évitement par une précocité de la floraison conduirait à « sacrifier » une part de la productivité (Lobell et *al.*, 2011 ; Blum,

1988). Au regard du fait que nous n'ayons pas eu une modification du cycle de floraison, il apparaît logique qu'on ne puisse observer une modification du rendement au cours du temps.

En définitive, toutes ces observations annoncent deux cas de figures probables chez les variétés paysannes de mil au Sénégal :

- d'une part celles-ci semblent potentiellement supporter ou **tolérer** les changements environnementaux observés;
- d'autre part, elles semblent développer des stratégies **d'adaptation** potentielles en réduisant leur taille (brin et épi).

D'une façon générale, nous ne pouvons confirmer un effet année significatif que pour deux variables : longueur du brin et de l'épi. Il semble que du fait d'un effet « site » important, l'effet année soit masqué. Nos résultats ont également montré un effet bloc.

Ces résultats doivent donc être confirmés par de nouveaux essais afin d'augmenter le pouvoir statistique et d'essayer d'approfondir cette étude sur l'évolution du mil traditionnel au Sénégal.

**CONCLUSION ET
PERSPECTIVES**

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Cette présente étude réalisée dans le cadre de la phase 1 du projet CERAO, a porté sur le phénotypage à l'échelle temporelle de variétés paysannes de mil au Sénégal.

Pour comprendre comment les systèmes de culture traditionnels paysans répondent aux changements environnementaux, nous avons axé notre étude sur les changements dans l'évolution morpho-phénotypique de variétés paysannes de mil à l'échelle nationale au cours de ces quarante dernières années. Nous avons analysé l'impact des périodes sèches qui ont caractérisées le Sahel depuis le début des années 1970 sur la morphologie des variétés paysannes de mil cultivées au Sénégal.

Les analyses des changements phénologiques et morphologiques au fil des années ont permis de distinguer des changements marqués dans les variétés pour les paramètres taille de la plante et de son épi. Il ne semble pas y avoir d'effet majeur temporel sur les autres caractères étudiés, en particulier sur l'épiaison, un caractère dont la précocité constitue un mécanisme adaptatif très souvent observé chez les plantes faces aux changements climatiques. Toutefois cet effet année pourrait exister, mais il serait masqué par la forte variabilité entre les sites (effet emboité significatif). Retenons malgré tout que face aux changements climatiques notables des dernières décennies, le comportement évolutif au cours du temps des variétés paysannes de mil au Sénégal apparait surtout marqué par le développement de stratégies adaptatives potentielles à travers une réduction de la taille des plantes et de leurs épis.

Ces résultats pourraient contribuer à mieux connaître les stratégies d'adaptation des plantes cultivées face aux changements climatiques. Une meilleure connaissance des aptitudes des plantes à se développer dans des environnements souvent hostiles, fournirait des stratégies appropriées pour renforcer l'adaptation des agroécosystèmes. Un défi pour l'agriculture future dans un climat changeant est de prédire quelles combinaisons de traits pourraient maximiser le développement tout en évitant les pénalités de rendement induit par des stress.

Les études se heurteraient néanmoins à une difficulté particulière chez le mil paysan du fait de son hétérogénéité phénotypique et de sa plasticité morphologique. Mais cette diversité disponible chez les variétés paysannes, en offrant plus de possibilités d'adaptation, constitue un atout favorisant le maintien du mil dans des milieux à fortes contraintes tels que l'Afrique subsaharienne.

Les expérimentations vont être reconduites pour encore deux saisons de culture. En attendant de les confronter à ceux des deux prochains essais et de les corroborer avec les analyses génétiques en cours, nos résultats ouvriraient probablement un « champ » d'études intéressant sur des évolutions adaptatives ou de tolérance potentielles des variétés paysannes de mil au Sénégal.

Dès lors, il apparaît indispensable de vérifier si un éventuel effet de conservation des semences aurait pu expliquer les différences morphologiques observées entre les échantillons.

Au regard des résultats obtenus, il serait intéressant d'étudier l'évolution des variétés paysannes au niveau de chaque site, pris individuellement.

Sur une échelle plus globale, il conviendrait aussi d'évaluer les conséquences du changement climatique sur la répartition spatio-temporelle des variétés de mil cultivées au Sénégal.

Nous suggérerions enfin qu'une étude détaillée du comportement des variétés sanio au cours du temps soit menée, mais cela avec un plus grand effectif de site de collecte en vue d'un échantillonnage représentatif.

REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Barrios S., Ouattara B., et Stroble E. (2008). The impact of climatic change on agricultural production: Is it different for Africa? *Food Policy*, 33: 287-298.
- Bates D., Maechler M., Bolker B., et Walker S. (2015). Fitting linear mixed-effects models using lme4. *Journal of Statistical Software*, 67 (1), 148.
- Beebee T. J. C. (1995). Amphibian breeding and climate. *Nature*, 374: 219 –220.
- Bezançon G., Pham J. L., Deu M., Vigouroux Y., Sagnard F., Mariac C., Kapran I., Mamadou A., Gérard B., Ndjeunga J., et Chantereau J. (2009). Changes in the diversity and geographic distribution of cultivated millet (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.) and sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) varieties in Niger between 1976 and 2003. *Genetic Resources and Crop Evolution* 56 (2): 223–236.
- Bezançon G., Renno J. F., et Kumar K. A. (1997). *Le Mil. L'amélioration Des Plantes Tropicales*. S. Hamon Ed., Paris. CIRAD. ORSTOM. P: 457–482.
- Blum A. (1988). Plant breeding for stress environment. *Boca Raton 4: CRC, Press*. 223.
- Bonfils P., Arend M., Kuster T. M., Junod P., et Günthardt-Goerg N.d. M. S. Le Chêne, une essence très flexible. https://www.researchgate.net/profile/Madeleine_Guenthardt-Goerg/publication/261946041.Le_chene_face_aux_changements_climatiques_1ere_partie_la_croissance_Le_chene_une_essence_tres_flexible/links/00463535f977a40314000000.pdf, consulté le 18 avril 2017.
- Both C., Artemyev A. V., Blaauw B., Cowie R. J., Dekhuijzen A. J., Eeva T., Enemar A., Gustafsson L., Ivankina E V., Jarvinen A., Metcalfe N. B., Nyholm N. E. I., Potti J., Ravussin P. A., Sanz J. J., Silverin B., Slater F. M., Sokolov L. V., Torok J., Winkel W., Wright J., Zang H., et Visser M. E. (2004). Large-scale Geographical Variation Confirms That Climate Change Causes Birds to Lay Earlier. *Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences* 271 (1549): 1657–1662.
- Bradford K. J., et Hsiao T. C. (1982). Physiological responses to moderate water stress. In: Lange OL, Norfl PS, Osmond CB, Ziegler H, eds. *Encyclopedia of Plant Physiology. Physiological Plant Ecology I*. New series V12 B. Berlin; Heidelberg; New York: SpringerVerlag.
- Burkle L. A., Marlin J. C., et Knight T. M. (2013), Plant-Pollinator Interactions over 120 Years: Loss of Species, Co-Occurrence, and Function. *Science*: Vol. 339, Issue 6127, pp. 1611-1615.

- Burnham K. P., et Anderson D. R. (2002). Model selection and multimodel inference: a practical information-theoretic approach. Springer, New York.
- Chartzoulakis K., Noitsakis B., et Therios I. (1993). Photosynthesis, plant growth and dry matter distribution in kiwifruit as influenced by water deficits. *Irrig Sci* ; 14: 1-5.
- Clavel D., Dramé N. K., Diop N. D., et Fodil Y. Z. (2005) Adaptation à la sécheresse et création variétale : le cas de l'arachide en zone sahélienne. *Fondamental OCL*, vol. 12 n° 3 mai-juin, 248-260.
- Cloutault J., Thuillet A. C., Buiron M., De Mita S., Couderc M. Haussmann B. I.G., Mariac C., et Vigouroux Y. (2012). Evolutionary history of pearl millet (*Pennisetum glaucum* [L.] R. Br.) and selection on flowering genes since its domestication. *Mol. Biol. Evol.* 29, 1199– 1212.
- Crimmins T. M., Crimmins M. A., et Bertelsen C. D. (2010). Complex responses to climate drivers in onset of spring flowering across a semi-arid elevation gradient. *Journal of Ecology*, 98 (5): 1042–1051.
- Dacosta H., Konaté Y. K., et Malou R. (2002). La variabilité spatio-temporelle des précipitations au Sénégal depuis un siècle. *IAHS Publ.* 499–506.
- Dai A. (2011). Drought under global warming: a review. *Wiley Interdiscip. Rev. Clim. Change* 2, 45–65.
- DAPSA (2013). Statistiques agricoles au niveau départemental et national de 1960 à 2013.
- Dewey M. (2017). metap: meta-analysis of significance values. R package version 0.8.
- Diack O., Kane N. A., Berthouly Salazar. C., Gueye M. C., Diop B. M., Amadou F., Sy O., Tall H., Zekraoui L., Piquet M., Couderc M., Vigouroux Y., Diouf D., et Barnaud A. (2017). New genetic insights into pearl millet diversity as revealed by characterization of early- and late-flowering landraces from Senegal. *Frontiers in Plant Science*, 8: 818, 9p.
- Dib T. A., Monneveux P., et Araus J. L. (1992). Adaptation à la sécheresse et notion d'idéotype chez le blé dur. II. Caractères physiologiques d'adaptation. *Agronomie* 12 (5): 381–393.
- Doi H., Takahashi M., et Katano I. (2010). Genetic diversity increases regional variation in phenological dates in response to climate change: Genetic diversity and phenology. *Global Change Biology* 16 (1): 373–379.
- Dray S., et Dufour A. B. (2007). The ade4 package: implementing the duality diagram for ecologists. *Journal of Statistical Software.* 22 (4): 1-20.

- Dunn P. O., et D. W. Winkler (1999). Climate change has affected the breeding date of tree swallows throughout North America. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 266 (1437): 2487–2490.
- FAO (2009). Comment nourrir le monde en 2050? Forum d'expert de haut niveau à la FAO.
- FAOSTAT (2013). Millets production in de wolrd. Available at: 325 <http://faostat.fao.org/site/567/DesktopDefault.aspx?PageID=567#ancor>.
- FAOSTAT (2017). « Food and agriculture organization united nation-Statistic division » (base de données). <http://faostat3.fao.org/home/E> consulté le 28 mars 2017.
- Faye A. (2017). Caractérisation agro-morphologique du souba et du sanio au Sénégal Mémoire de Master 2. Université Gaston Berger. Sénégal. 44p.
- Fitter A. H., Fitter S. R., Harris I. T. B., et Williamson M. H. (1995). Relationships between first flowering date and temperature in the flora of a locality in Central England. *Functional Ecology*, Vol. 9(1), pp. 55-60.
- Forister M. L., et Shapiro A. M. (2003). Climatic trends and advancing spring flight of butterflies in lowland California. *Global Change Biology* 9, 1130-1135.
- Gideon E. S. (1978). « Estimating the dimension of a model », *Annals of Statistics*, vol. 6, n° 2, p. 461-464.
- GIEC (2014). Changements climatiques 2014: Incidences, adaptation et vulnérabilité. Résumé à l'intention des décideurs. Contribution du Groupe de travail II au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. Organisation météorologique mondiale, Genève (Suisse), 34 pages.
- Gruner D. S., Bracken M. E. S., Berger S. A., Eriksson B. K., Gamfeldt L., Matthiessen B., Moorthi S., Sommer U., et Hillebrand H. (2016). Effects of experimental warming on biodiversity depend on ecosystem type and local species composition. *Oikos*, 126: 8–17.
- Hausmann B. I. G., Boubacar A., Boureima S. S., et Vigouroux Y. (2006). Multiplication and Preliminary Characterization of West and Central African Pearl Millet Landraces. 110 *ISMN* 47.
- Hausmann, B. I. G., Boureima S. S., Kassari I. A., Moumouni K. H., et Boubacar A. (2007). Mechanisms of Adaptation to climate variability in West African pearl millet landraces—a preliminary. *Journal of SAT Agricultural Research* 3 (1): 1–3.

- Heide O. M. (2003). The high autumn temperature delays the bursting of spring buds in boreal trees, counterbalancing the effect of global warming. *Tree Physiol*, 23 (13): 931-936.
- Hickling (2005). A northward shift of range margins in british Odonata. *Global Change Biology - Wiley Online Library*. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1365-2486.2005.00904.x/full>, consulté le 14 avril 2017.
- Kazan K., et Lyons R. (2015). The link between flowering time and stress tolerance. *Journal of Experimental Botany*, 67(1): 47–60.
- Knox J., Hess T., Daccache A., et Wheeler T. (2012). Climate change impacts on crop productivity in Africa and South Asia. *Environ. Res. Lett.*, 7: 1-8.
- Kondombo C. P. (2010). Diversités agro-morphologique et génétique de variétés locales de sorgho [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] du Burkina Faso. Eléments pour la valorisation des ressources génétiques locales. Thèse de Doctorat. Université de Ouagadougou, Burkina Faso.
- Körner C., et Basler D. (2010). Phenology under global warming. *Science*, vol 327 (1461).
- Kudo G., et Ida Takashi Y. (2013). Early onset of spring increases the phenological mismatch between plants and pollinators. *Ecology*, 94(10): 2311–2320.
- Labeyrie V. (2013). L'organisation sociale des plantes cultivées : Influence des échanges, représentations et pratiques sur la diversité du sorgho (*Sorghum bicolor* [L.] Moench) chez les peuples du mont Kenya. Thèse de Doctorat. <http://agritrop.cirad.fr/572884/>, consulté le 21 mars 2017.
- Lewis L. R. (2010). Biogeography and genetic diversity of pearl millet (*Pennisetum glaucum*) from Sahelian Africa. *The Professional Geographer*, 62 (3): 377–394.
- Lobell D. B., Schlenker W., et Costa R. J. (2011). Climate trends and global crop production since 1980. *Science*, 333: 616–620.
- Luterbacher J., Liniger M. A., Menzel A., Estrella N., Della-Marta P. M., Pfister C., Rutishauser T., et Xoplaki E. (2007). Exceptional European warmth of autumn 2006 and winter 2007: Historical context, the underlying dynamics, and its phenological impacts. *Geophysical Research Letters*, 34 (12): L12704.
- Manning K., Pelling R., Higham T., Schwenniger J. L., et Fuller D. Q. (2011). 4500-Year old domesticated pearl millet (*Pennisetum glaucum*) from the Tilemsi Valley, Mali: new insights into an alternative cereal domestication pathway. *J. Archaeol. Sci.* 38 (2):312-322

- McKinney A. M., CaraDonna P.J., Inouye D. W., Barr B., Bertelsen C. D., et Waser N. M. (2012). Asynchronous changes in phenology of migrating broad-tailed hummingbirds and their early-season nectar resources. *Ecology*, 93 (9): 1987–1993.
- Menzel A. (2000). Trends in phenological phases in Europe between 1951 and 1996. *Int J Biometeorol.* Volume 44 (2): 76–81.
- Menzel A. (2003). Plant phenological anomalies in Germany and their relation to air temperature and nao. *Climatic Change.* Volume 57 (3): 243–263.
- Menzel A., et Peter F. (1999). Growing season extended in Europe. *Nature* 397, 659.
- Menzel A., Estrella N., et Fabian P. (2001). Spatial and temporal variability of the phenological seasons in Germany from 1951 to 1996. *Global Change Biology* 7(6): 657–666.
- Nevo E., Fu Y. B., Pavlicek T., Khalifa S., Tavasi M., et Belles A. (2011). Evolution of wild cereals during 28 years of global warming in Israel. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 109 (9): 3412–3415.
- Oumar I., Mariac C., Pham J. L., et Vigouroux Y (2008). Phylogeny and origin of pearl millet (*Pennisetum glaucum* [L.] R. Br) as revealed by microsatellite loci. *Theoretical and Applied Genetics*, 117 (4): 489–497.
- Parmesan C. (2006). Ecological and evolutionary responses to recent climate change. *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.*, 37, 637-669.
- Parmesan C., et Yohe G. (2003). A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. *Nature*, 421 (6918): 37–42.
- Pham J. L., Gérard B., Kapran I., Sagnard F., Deu M., Chantereau J., Ali A., Ndjeunga J., Luong V., Thuillet A. C., Saidou A. A., et Bezançon G. (2011). Selection for earlier flowering crop associated with climatic variations in the sahel. *Matjaz Perc, ed. PLoS ONE*, 6 (5): e19563.
- PSE (2014). Manuel stratégique d'une nouvelle trajectoire de développement pour le Sénégal vers l'horizon 2035, Sénégal, 184p.
- Rowell D. P. (2006). A demonstration of the uncertainty in projections of uk climate change resulting from regional model formulation. *Clim. Change*, 79, 243–257.
- Royston P. (1995). Remark AS R94: A remark on algorithm AS 181: The *W* test for normality. *Applied Statistics*, 44, 547–551.
- Siebert S., et Ewert F. (2012). Spatio-temporal patterns of phenological development in

- Silva R. S., Kumar L., Shabani F., et Picanço M. C. (2016). Assessing the impact of global warming on worldwide open field tomato cultivation through csiro-mk3.0 global climate model. *The Journal of Agricultural Science*, 155 (03): 407–420.
- Skarbo K., et VanderMolen K. (2015). Maize Migration: Key crop expands to higher altitudes under climate change in the andes. *Climate and Development*, 8 (3): 245–255.
- Slama A., Monsef B. S., M'barek B. N., et Ezziddine Z. (2005). Les céréales en Tunisie : Production, effet de la sécheresse et mécanisme de résistance. *Sécheresse*, 16 (3): 225-9.
- Sparks T. H., et Menzel A. (2002). Observed Changes in seasons: an overview. *International Journal of Climatology* 22 (14): 1715–1725.
- Sparks T. H., Jeffree E.P., et Jeffree C. E. (2000). An examination of the relationship between flowering times and temperature at the national scale using long-term phenological records from the UK. *International Journal of Biometeorology*, Volume 44 (2): 82–87.
- Stich B., Haussmann B. I. G, Pasam R., Bhosale S., Hash C T., Melchinger A. E., et Parzies H. K. (2010). Patterns of molecular and phenotypic diversity in pearl millet [*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.] from West and Central Africa and their relation to geographical and environmental parameters. *BMC Plant Biology*, 10:216.
- Sultan B., Roudier P., et Traoré S. (2015). Les changements climatiques sur les rendements agricoles en Afrique de l'ouest. *Environmental Research Letter*, 10: 209-222.
- Sultan B., Roudier P., Quirion P., Alhassane A., Muller B., Dingkuhn M., Ciais P., Guimberteau M., Traore S., et Baron C. (2013). Assessing climate change impacts on sorghum and millet yields in the Sudanian and Sahelian savannas of West Africa. *Environ. Res. Lett.* 8, 014040 (9pp).
- Sylla M. B., Giorgy F., Pal J. S., Gibba P., Kebe I., et Nikiema M. (2015). Projected changes in the annual cycle of high-intensity precipitation events over West Africa for the late twenty-first century. *J. Clim.* 28, 6475– 6488.
- Tostain S. (1998). Le Mil, une longue histoire: Hypothèses sur sa domestication et ses migrations. http://horizon.documentation.ird.fr/exloc/pleins_textes/pleins_textes_7/b_fdi_03_04/010013294.pdf, consulté le 18 avril 2017.
- Van Herk C. M., Aptroot A., et Van Dobben H. F. (2002). Long-term monitoring in the Netherlands suggests that lichens respond to global warming. *Lichenologist*, 34 (2): 141-151.
- Wickham H. (2009). *ggplot2: Elegant graphics for data analysis*. Springer-Verlag New York.

- Winkel T., et Do F. (1992). Caractères morphologiques et physiologique de résistance du mil (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.) à la sécheresse. *L'Agronomie Tropicale* 46-4, 339-351.
- Zgallai H., Steppe K., et Lemeur R. (2007). Etude des caractères morphologiques des plantes de tomate soumises à un déficit hydrique en milieu hydroponique. *Sécheresse*, 18 (1): 57-64.
- Zhu Y., Chen H., Fan J., Wang Y., Li Y., Chen J., et Mew T. W. (2000). Genetic diversity and disease control in rice. *Nature*, 406 (6797), 718-722.

ANNEXES

ANNEXES

Annexe 1 : Carte de translation des isohyètes au Sénégal



Figure 1 : Carte de translation des isohyètes au Sénégal

(<http://www.cartographie.ird.fr/SenegalFIG/secheresse.html>, consulté le 9 mai 2017)

Annexe 2 : Evolution de la production agricole au Sénégal

La production agricole sénégalaise est dominée par les céréales (mil, maïs, riz), principales cultures vivrières, l'arachide, principale culture de rente, le maraichage et l'arboriculture (DAPSA, 2013). Faces aux nécessités de relancer son économie agricole, le Sénégal a mis en place dès les années 1960 des programmes et des structures de développement agricoles et rurales à l'exemple de l'ANCAR, de la SODEVA, de la SAED, de la SODAGRI. Avec pour principal objectif d'augmenter les rendements, ces programmes ont tour à tour proposé des nouvelles variétés améliorées, renforcé la technicité et les équipements agricoles, promu certaines cultures comme le maïs et le riz. Mais malgré cela, l'agriculture sénégalaise n'a pas réussi à ce jour à relever les défis d'autosuffisance et de sécurité alimentaire.

L'arachide et le mil représentent à eux deux plus de 67 % de la production et 82 % des surfaces cultivées (DAPSA, 2013). Entre 1990 et 2013, la production d'arachide a été en moyenne multipliée par 1,2 et la surface cultivée par 1,1 au niveau national. De la même façon, le mil n'a multiplié sa production que de 1,1 sans augmentation de surface cultivée.

Le maïs a connu une forte hausse de production entre les années 2000-2009 suite à des incitatives gouvernementales, pour finalement retrouver son niveau des années 90. Au contraire, le riz a vu sa production doublée depuis les années 1990 et ceci principalement depuis les années 2010 ; la région de Saint-Louis fournissant 70 % de la production nationale.

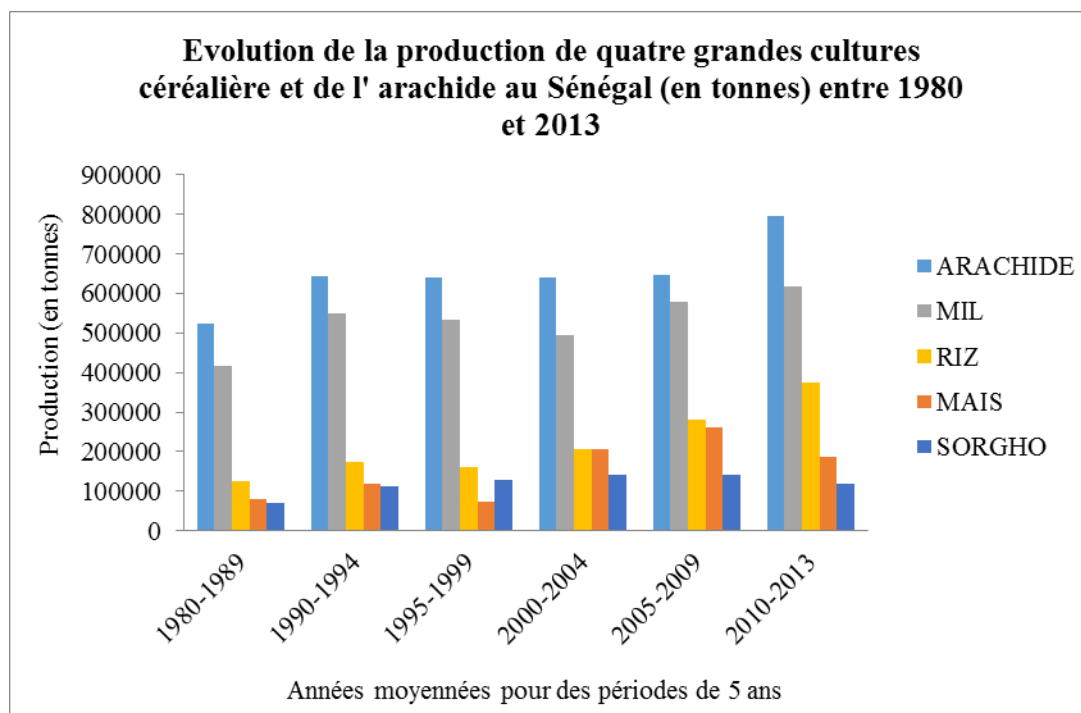


Figure 2 : Evolution de la production de quatre grandes cultures céréalières et de l'arachide (en tonnes) au Sénégal entre 1990 et 2013

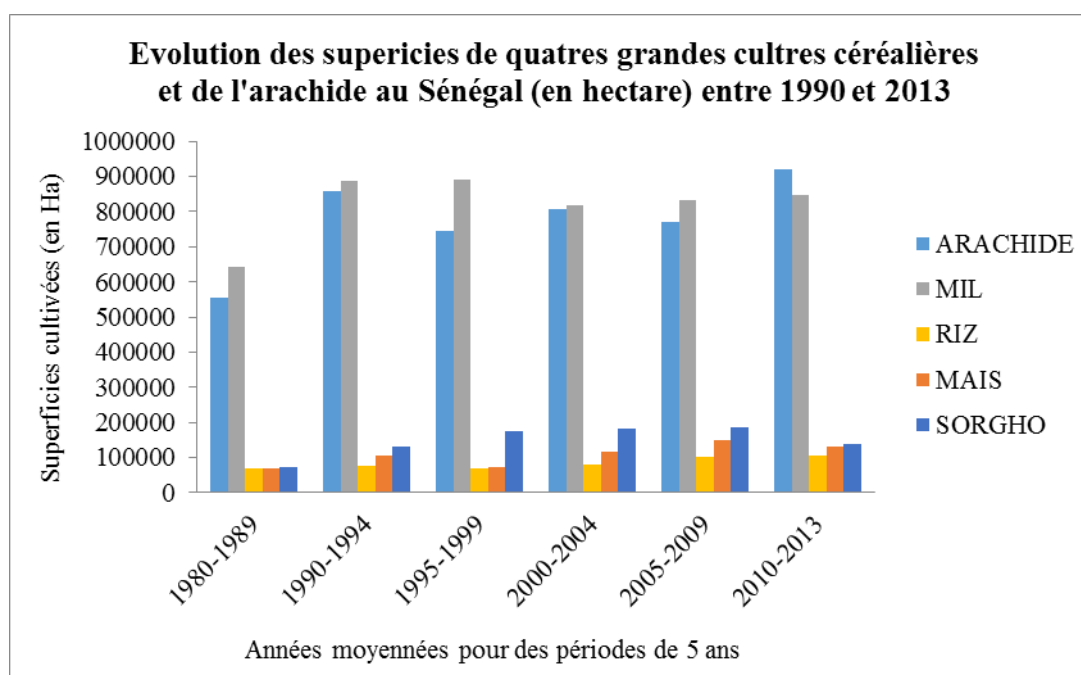


Figure 3 : Evolution des superficies cultivées (en hectare) de quatre grandes cultures céréalières et de l'arachide (en tonnes) au Sénégal entre 1990 et 2013

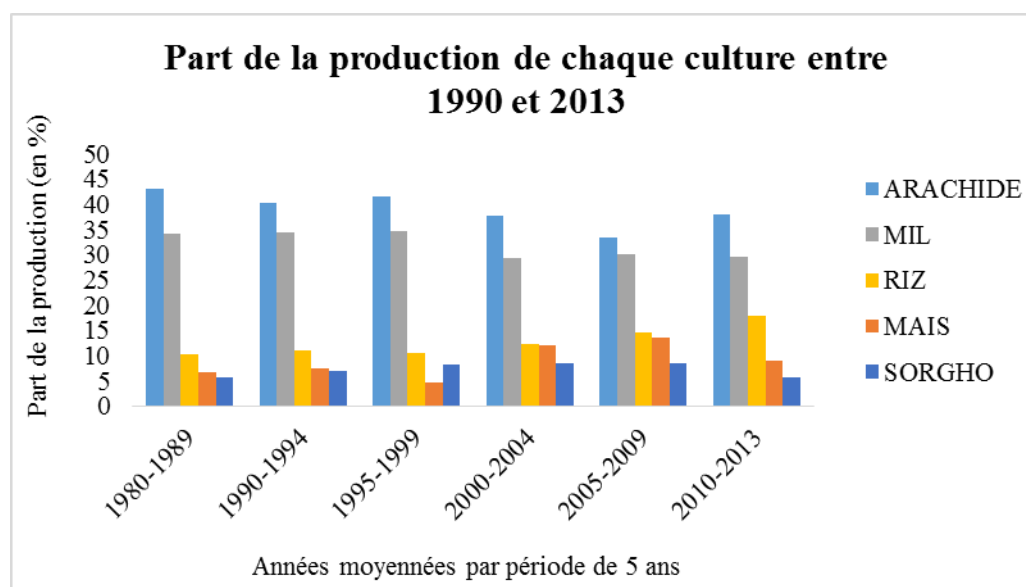


Figure 4 : Part de la production de chaque cultures (en pourcentage) entre 1990 et 2013

Tableau 1 : Evolution de la production de mil (en tonnes) au Sénégal de 1990 à 2013

(Source: DAPSA, 2013)

Région	1990-1994	1995-1999	2000-2004	2005-2009	2010-2013
Dakar	147	66	7	12	0
Diourbel	68555	45872	47828	66062	71440
Fatick	73434	81322	92842	94191	139025
Kaolack	227564	225625	191997	183242	202477
Kolda	53503	36360	31857	59852	55252
Louga	29004	38708	24849	31205	28103
Saint Louis	4594	5771	5589	19260	15925
Tambacounda	22397	28863	46747	52580	38482
Thiès	60353	58800	32979	57690	59156
Ziguinchor	10774	13633	19365	15934	8123
Somme	550325	535020	494059	580027	617984
% nationale	34.4	34.8	29.3	30.0	29.6

Tableau 2: Evolution de la production arachidière (en tonnes) au Sénégal de 1990 à 2013
(Source: DAPSA, 2013)

Région	1990-1994	1995-1999	2000-2004	2005-2009	2010-2013
Dakar	361	330	65	401	1490
Diourbel	51166	30225	38650	30633	58883
Fatick	72035	95206	74501	81823	131375
Kaolack	262019	267858	236020	232924	281192
Kolda	80461	88386	92019	129780	94109
Louga	46476	49029	75759	62278	69753
Saint Louis	2266	1520	3137	2851	4687
Tambacounda	70802	55739	71448	54022	65936
Thiès	40732	39533	30707	38099	73691
Ziguinchor	17970	12027	16679	15084	14134
Somme	644288	639853	638984	647894	795250
% nationale	40.2	41.6	37.8	33.5	38.0

Tableau 3: Evolution de la superficie arachidière cultivée (en hectare) au Sénégal de 1990 à 2013 (Source: DAPSA, 2013)

Régions	1980-1989	1990-1994	1995-1999	2000-2004	2005-2009	2010-2013
Dakar	126	963	574	138	702	2420
Diourbel	52507	87373	60346	67218	51521	87605
Fatick	62658	105763	109053	92041	83306	153494
Kaolack	152436	299573	262948	240026	259650	282161
Kolda	68087	75910	83662	81060	112736	78838
Louga	86935	95554	89961	163381	115258	131006
SaintLouis	1237	8856	4456	9697	8145	12795
Tambacounda	36050	71808	49842	68216	59731	67029
Thies	75765	94365	71083	67970	62151	91144
Ziguinchor	18978	17324	13134	17725	17607	15009
Somme	554778	857487	745058	807470	770806	921501
% nationale	100,0	57,1	45,7	47,6	48,5	52,6

Tableau 4: Evolution de la superficie de mil cultivée (en hectare) au Sénégal de 1990 à 2013

(Source: DAPSA, 2013)

Régions	1980-1989	1990-1994	1995-1999	2000-2004	2005-2009	2010-2013
Dakar	0	522	175	48	33	0
Diourbel	76935	120966	116723	98011	109680	114492
Fatick	81256	126087	140516	132258	136849	185362
Kaolack	153214	292340	266011	225130	225446	230252
Kolda	37802	58272	44070	38194	65506	57597
Louga	127707	96323	112785	119592	79634	69311
SaintLouis	23103	20817	23672	23961	36312	36828
Tambacounda	32749	31108	37462	45763	54099	48276
Thies	103382	123793	117477	100645	102494	93158
Ziguinchor	7633	15325	31431	35539	21900	10877
Somme	643781	885553	890321	819140	831954	846153
% nationale	45,7	43,1	45,6	40,8	40,8	39,5

Les valeurs sont moyennées pour des périodes de 5 ans. Les valeurs maximales de chaque colonne sont notées en bleu

En résumé, nous pouvons constater que depuis 20 ans il n'y a pas eu de véritable évolution de la distribution spatiale des cultures si ce n'est pour le riz dans la vallée du fleuve. De même, en terme de production et de surface, et donc de rendement, l'agriculture sénégalaise ne s'est pas fortement transformée. Malgré les incertitudes liées aux données nationales qui ne sont que des estimations d'un échantillonnage réduit de paysans, nous pouvons nous poser la question à savoir si cette stabilité apparente de la production, malgré les changements climatiques notables des dernières décennies, pourrait traduire une certaine « adaptabilité » des agrosystèmes.

Comprendre ces stratégies et leur impact sur l'évolution et l'adaptation des variétés est crucial pour permettre à l'agriculture familiale de faire face aux défis majeurs à venir.

Annexe 3 : Etapes de développement du mil



Phase végétative

Phase reproductive

Phase de maturation

Etapes de développement du mil (Crédits photo Aby CISSE)