

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, option Productions Végétales et Agronomie**

**Caractérisation agromorphologique des variétés de mil souna et sanio du Sénégal, un  
potentiel adaptatif face aux changements climatiques.**

Présenté et soutenu publiquement par **M. Aliou FAYE**

Le 17 juillet 2017

**Devant le Jury composé de:**

Président : M. Amadou Bocar BAL	S2ATA/ UGB
Membres : M. Papa Madiallacké DIEDHIU	S2ATA / UGB
MME. Cécile Berthouly SALAZAR	IRD
M. Ndjido Ardo KANE	LNRPV/ISRA
M. César BASSENE	S2ATA/UGB

.....  
**Directeur de mémoire :** Dr César BASSENE, Enseignant chercheur à l'UFR-S2ATA/UGB

**Co-directeurs de mémoire :** Dr Cécile Berthouly SALAZAR et Dr Ndjido Ardo KANE

**Superviseur :** Pr Papa Madiallacké DIEDHIU, Directeur de l'UFR-S2ATA/UGB

## Dédicaces

*Je dédie ce travail à :*

*Mon père Moussa FAYE et ma mère Amy MBAYE*

*Chers parents, vous avez consenti d'énormes sacrifices pour notre éducation, pour l'amour éternel et l'affection à mon égard.*

*Pourrai-je devenir un jour pour mes enfants ce que vous êtes pour moi : Symbole de foi, du courage et de l'amour de travail dans l'honnêteté, la discipline et le respect du prochain.*

*Puisse Dieu vous garde encore longtemps à mes côtés*

*M. Ousmane NDIAYE, pour le soutien sans cesse que vous m'avez apporté et tes sages conseils. J'en suis infiniment reconnaissant.*

*Mes frères et sœurs, qui m'ont toujours soutenu tout au long de mes études*

*Ce travail est le vôtre.*

*A mon frère Ibrahima FAYE, Vous qui m'avez appris le sens de la famille, de l'unité, de la fraternité; reconnaissez ici mon profond amour.*

*Que Dieu nous garde encore unis pendant longtemps, dans le bonheur, la prospérité et la réussite.*

*Ce travail vous est dédié pour servir d'exemple. Mon souhait est de vous voir mieux faire.*

*A mes amis, trouvez ici toute l'expression de mes sentiments*

*A tous mes camarades de promotion, mes anciens et mes cadets de l'UGB.*

## Remerciements

Tout d'abord je rends grâce à **ALLAH**, le Tout Puissant de m'avoir permis de mener à terme ce travail. Après cinq ans de formation, il est de tradition de remercier celles et ceux grâce auxquels ce travail de mémoire de fin d'études a été réalisé. Cependant, cet exercice demeure délicat dans la mesure où il est difficile de résumer en quelques mots ma reconnaissance pour ceux qui, par la grâce de Dieu, m'ont soutenu durant toutes ces années.

D'abord mes remerciements vont à l'encontre de tous ceux qui ont contribué à la réalisation de ce travail. Par-là, je veux citer mes encadreurs, **Dr Cécile Berthouly SALAZAR** qui a bien voulu, malgré ses nombreuses occupations, consacrer de nombreuses entrevues pour discuter le travail, m'apporter des conseils précieux, faire des remarques et critiques pertinentes et constructives dans l'exploitation des résultats et la réalisation de ce texte de synthèse. Son soutien sur le terrain m'a été essentiel pour mener à bien mes expérimentations. Je tiens également à souligner toute la confiance qu'il a eue en moi, laquelle a été un moteur pour la réussite à l'aboutissement de ce travail.

J'exprime mes profonds remerciements au **Dr César BASSENE** de bien vouloir accepter de m'encadrer. Son oeil critique m'a été très utile pour structurer et améliorer la qualité de ce rapport. Ma reconnaissance se tourne également vers le **Dr. Ndjido Ardo KANE** qui a accepté de co-encadrer ce travail. Ma considération est inestimable pour vous.

Merci au représentant de l'IRD au Sénégal, Monsieur **Laurent VIDAL** de m'avoir accueilli dans la structure dont il assure la direction et tout le personnel de la structure.

Merci au Directeur de l'UFR-S2ATA, Professeur Pape Madiallacké DIEDHIOU et tout le corps professoral en particulier au chef de section **Productions Végétales et Agronomie**, Dr Anicet MANGA. Vous avez toujours œuvré dans le but de nous fournir un enseignement de qualité. Je vous serais éternellement reconnaissant.

Mes remerciements au président du jury Pr Amadou Bocar BAL qui a bien voulu présider cette soutenance et aussi à tous les membres du jury qui ont bien voulu juger ce travail malgré leurs lourdes occupations. Un grand merci à Dr Adama FAYE de l'IRD, à Katina OLODO, Khadim DIOUF pour les nombreux services rendus, leur aide sur le terrain et leur contribution à l'élaboration du document

A tous les étudiants de l'UFR-S2ATA, surtout ceux de la M2 PVA avec qui j'ai passé cinq longues années inoubliables en particulier à Papa Ndiaga LOUME, Oumar Mal SARR, Bakary DIAITE, Bécaye NDIAYE, Mamadou Lamine DIEDHIOU, Aby CISSE, Coumba FALL, Ibrahima GUEYE ...,

## **LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS**

**ACP** : Analyse en Composantes Principales

**AIC** : Critère d'Information d'Akaike

**CNRA** : Centre Nationale de Recherches Agronomiques

**BIC** : Critère d'Information Bayésien

**DAPSA** : Direction de l'Analyse, de la Prévision et des Statistiques Agricoles

**FAO** : Organisation des Nations Unies pour l'Agriculture et l'Alimentation

**IRD** : Institut de Recherche pour le Développement

**ISRA** : Institut Sénégalais de Recherches Agricoles

**JAL** : Jours Après Levé

**JAS** : Jours Après Semis

**NPK** : Azote, Phosphate et Potassium

**UGB** : Université Gaston Berger

**UFR** : Unité de Formation et de Recherche

**S2ATA** : Sciences Agronomiques, de l'Aquaculture et des Technologies Alimentaires

## LISTE DES TABLEAUX

<b>Tableau 1.</b> Niveau de corrélation entre les différentes variables.....	16
<b>Tableau 2.</b> Contribution de chaque variable aux axes de l'ACP.....	18
<b>Tableau 3.</b> Modèles linéaires testés sur l'épiaison avec la p-value du Shapiro test des résidus du modèle, valeurs de AIC et de BIC.....	19
<b>Tableau 4.</b> Modèles linéaires testés sur la longueur du brin avec la p-value du Shapiro test des résidus du modèle, valeurs de AIC et de BIC.....	20
<b>Tableau 5.</b> Modèles linéaires testés sur le diamètre du brin avec la p-value du Shapiro test des résidus du modèle, valeurs de AIC et de BIC.....	22
<b>Tableau 6.</b> Modèles linéaires testés sur la longueur de l'épi avec la p-value du Shapiro test des résidus du modèle, valeurs de AIC et de BIC.....	23
<b>Tableau 7.</b> Modèles linéaires testés sur le diamètre de l'épi avec la p-value du Shapiro test des résidus du modèle, valeurs de AIC et de BIC.....	24
<b>Tableau 8.</b> Modèles linéaires testés sur la fertilité avec la p-value du Shapiro test des résidus du modèle, valeurs de AIC et de BIC.....	25
<b>Tableau 9.</b> Récapitulatif des différences entre mil souna et sanio suivants les variables.....	25

## LISTE DES FIGURES

<b>Figure1.</b> Répartition de la pluviométrie et de la température enregistrée à Bambey (CNRA) en 2016.....	11
<b>Figure 2.</b> Schéma du dispositif expérimental.....	12
<b>Figure 3.</b> ACP entre les deux groupes de mils A) PC1 & PC2 ; B) PC1 & PC3.....	17
<b>Figure 4.</b> ACP entre les accessions de mil axes 1 & 2.....	17
<b>Figure 5.</b> Boxplot de l'épiaison des accessions de mil souna et sanio.....	18
<b>Figure 6.</b> Boxplot du diamètre des brins des accessions de mil souna et sanio.....	20
<b>Figure 7.</b> Boxplot de la longueur des brins des accessions de mil souna et sanio.....	21
<b>Figure 8.</b> Boxplot de la fertilité des accessions de mil souna et sanio.....	22
<b>Figure 9.</b> Boxplot du diamètre des épis des accessions de mil souna et sanio.....	23
<b>Figure 10.</b> Boxplot de la longueur des épis des accessions de mil souna et sanio.....	24

## LISTE DES ANNEXES

<b>Annexe 1.</b> QQPLOT des résidus du modèle linéaire 2.....	38
<b>Annexe 2.</b> QQPLOT des résidus du modèle linéaire 2.....	38
<b>Annexe 3.</b> QQPLOT des résidus du modèle linéaire 2.....	39
<b>Annexe 4.</b> QQPLOT des résidus du modèle linéaire 2.....	39
<b>Annexe 5.</b> QQPLOT des résidus du modèle linéaire 2.....	41
<b>Annexe 6.</b> QQPLOT des résidus du modèle linéaire 2.....	41

## Tables des matières

Dédicaces .....	I
Remerciements .....	II
LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS.....	III
LISTE DES TABLEAUX .....	IV
LISTE DES FIGURES .....	IV
LISTE DES ANNEXES .....	IV
Tables des matières .....	V
Résumé .....	VII
Abstract.....	VIII
INTRODUCTION:.....	1
I. REVUE BIBLIOGRAPHIQUE : .....	3
a) Evolution et adaptation des plantes aux changements climatiques.....	3
b) L'importance des variétés à cycle long et court pour l'adaptation de l'agriculture face aux changements climatiques. ....	5
c) Le cas du mil .....	6
1.1 Position systématique et description botanique du mil .....	6
1.2 Cycle de développement .....	7
1.3 Exigences écologiques .....	8
1.4 Les Contraintes à la production du mil .....	8
1.5 Origine, répartition géographique et diversité des formes cultivées.....	9
II. MATERIEL ET METHODES .....	11
2-1. Présentation de la zone d'étude.....	11
2.2. Matériel végétal.....	11
2.3. Dispositif expérimental.....	12
2.4. Conduite de l'essai .....	13
2.4.1. Opérations avant le semis : .....	13
2.4.2. Du semis à la maturité.....	13
2.4.3. Observations et mesures .....	14
2.5 Analyse statistique .....	15
III. RESULTATS .....	16
3.1 Corrélation entre les variables : .....	16
3.2 Analyse en Composantes Principales (ACP).....	16
3-3- Résultats obtenus sur les observations .....	18
3-3-1-Epiaison sur les brins maîtres.....	18

<b>3-2-2- Aristation de l'épi</b> .....	19
<b>3-4- Résultats obtenus sur mesures</b> .....	19
<b>3-4-1- Paramètres de croissance</b> .....	19
3-4-1-1- Diamètre du brin maître .....	19
3-4-1-2- Longueur du brin maître .....	21
<b>3-5-2- Paramètres de rendement</b> .....	22
3-5-2-1- Ratio de fertilité .....	22
3-5-2-2- Diamètre de l'épi du brin maître.....	23
3-5-2-3- Longueur de l'épi du brin maître .....	24
<b>VI. DISCUSSIONS</b> .....	<b>26</b>
<b>CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES :</b> .....	<b>29</b>
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES</b> .....	<b>30</b>

## Résumé

Les changements climatiques aboutiront à des modifications sur la température et la pluviométrie et par conséquent pourront affecter les systèmes de cultures et la production agricole. L'agriculture de demain reposera en grande partie sur une adaptation des espèces végétales en fonction des milieux. Ainsi une technique de production telle que l'association culturale semble être une forme d'adaptation pouvant limiter les pertes de production en cas d'aléas climatiques.

L'objectif de notre étude est de faire une caractérisation agromorphologique des variétés de mils précoces dits « souna » et du mil tardifs dits « sanio » du cultivés au Sénégal dans la région de Fatick précisément dans la zone de Niakhar. Un dispositif expérimental en blocs complets à un facteur (la variété) et à trois répétitions a été mis en place au CNRA de Bambey. Les mesures ont porté sur des caractères agromorphologiques tels que la date de l'épiaison, la longueur et diamètre du brin et de l'épi, etc. Les résultats ont montré que les accessions de mils souna et sanio du Sénégal se différencient par la date de l'épiaison qui tourne autour de 47 jours chez les variétés précoces (souna) et 77 jours chez les tardives avec une grande variabilité surtout au niveau des sanio. La longueur du brin est plus importante chez le mil tardif (sanio) avec 295 cm contre 244 cm pour le mil précoce (souna) et contrairement à la longueur des épis qui est plus important chez le mil précoce 64 cm contre 56 cm pour le mil tardif. Les résultats sur l'aristation montrent 99.84% de présence de poils (sanio) contre 2% (souna). Cependant, les deux groupes présentent un même niveau de fertilité. La différence du point de vue agromorphologique observée chez les deux variétés de mil peut ouvrir la voie à la création de certains idéotypes complémentaire maximisant l'association variétale face aux changements climatiques.

**Mots clés : Changements climatiques, caractérisation, agromorphologique, variété, mil, souna, sanio**

## **Abstract**

Climate change will lead to changes in temperature and rainfall, and therefore may affect crop production in terms of yields and cropping systems. Future's agriculture will rely on adaptation of plant species to crop conditions and crop cycles. Thus, a strategy such as association of two or more varieties with different cycles seems to be one form of adaptation that can limit losses of production in case of hazards climatic event.

Our study's goal is to characterize agro-morphological traits of early-flowering pearl-millet varieties known as "souna" (92 accessions) and the late-flowering pearl-millet called "sanio" (49 accessions) from Senegal (Fatick: Niakhar). An experimental randomized complete block with one-factor (variety) and three repeat was set up at CNRA Bambey. The measurements were based on agromorphological characteristics such as flowering time, length and diameter of strand and spike, etc. The results showed that varieties of millet souna and sanio of Senegal are differentiated by flowering time was about 47 days for early-flowering accessions (souna) and 77 days for late-flowering accessions varieties with a great variability especially with sanio. Strand's length is higher in late millet (295 cm against 244 cm), while spike's length is important in early millet (64 cm against 56 cm). The results on the aristation show 99.84% (sanio) of presence of hairs against 2% (souna). However, the two groups have same level of fertility whereas in the past sanio were more productive because they are grown in the most humid areas. This agromorphological difference observed in the two varieties of pearl-millet may open the way to the creation of complementary ideotypes that would maximize intercropping in regards to climatic changes.

**Keywords:** Climate change, characterization, agromorphological, variety, millet, souna, sanio

## INTRODUCTION:

Au cours des prochaines décennies, la forte croissance démographique se traduira par une demande alimentaire accrue (FAO, 2015). Parallèlement, on assistera à une diminution voire une dégradation des terres cultivables, et celle-ci sera associée à une évolution du climat (GIEC, 2007). Cette modification prévisible de l'environnement mondial touchera à la fois, le régime des eaux et les températures, pouvant alors influencer significativement la répartition des espèces (Walther *et al.*, 2002). L'Afrique, et plus particulièrement dans sa partie subsaharienne, sera caractérisée par un climat aride marqué à la fois par une grande variation des facteurs climatiques (Sultan *et al.*, 2008). Ces changements climatiques affecteront de façon significative et négative les rendements agricoles. Les variations de la pluviométrie d'une année à l'autre et l'augmentation accrue de l'évapotranspiration par une forte insolation pourront conduire à la réduction du cycle des cultures en Afrique entraînant une baisse de rendement du mil de 10% (Knox *et al.*, 2012). Ainsi, face à ces défis de changements climatiques et de réduction des terres cultivables par l'accroissement démographique, les acteurs du monde agricole devront prendre en compte à la fois le choix des variétés utilisées, repenser les pratiques culturales et modifier les calendriers culturaux, pour pallier aux effets du changement climatique et subvenir aux besoins. Parallèlement, les sélectionneurs devront faire des efforts pour trouver des cultivars à meilleur rendement et plus résistants aux facteurs biotiques et abiotiques.

Pour des pays comme le Sénégal, situé dans la zone soudano-sahélienne, l'avancée de la sécheresse ainsi que la variabilité spatio-temporelle de la pluviométrie sont les contraintes majeures qui menacent la production agricole. L'agriculture sénégalaise est dominée par des exploitations de types familiales qui occupent environ 95 % des terres agricoles du pays, avec des tailles de moins de 5 ha et qui assurent la subsistance d'une population rurale estimée à 69% par rapport à celle du pays (FAO, 2015). Cette agriculture repose principalement sur la conjugaison d'une culture de rente dominante qu'est l'arachide et de cultures vivrières céréalières (mil, maïs, sorgho, et riz). L'arachide et le mil représentent plus de 67% de la production et 82 % des surfaces emblavées (DAPSA, 2013).

Dès lors, la production agricole au Sénégal doit faire face au triple défi de la croissance démographique, de la disponibilité réduite des terres dédiées à l'agriculture et des aléas climatiques. Pour sécuriser cette production agricole dans un contexte de changement climatique, les agriculteurs devront mettre en place des pratiques adaptatives permettant

d'assurer le rendement nécessaire. L'association de variétés à cycle long et cycle court est une des stratégies adaptatives les plus observées pour de nombreuses cultures (arachide, sorgho, mil, etc.).

C'est dans ce contexte que cette étude se propose de faire la caractérisation agromorphologique des variétés de mil à cycle court « souna » et de mil à cycle long « sanio » cultivées au Sénégal dans un contexte de changement climatique pour voir le potentiel adaptatif de ces variétés et la possibilité de les utiliser en association afin de limiter les incertitudes liées aux variations intra-annuelles des régimes pluviométriques.

De façon spécifique, il s'agira d'évaluer les caractéristiques agromorphologiques des deux groupes de variétés *à priori* phénologiquement différentes, dans une perspective de valorisation de la stratégie adaptative associant des variétés de cycles différents.

C'est ainsi que le présent travail se présente comme suit : une première partie qui porte sur une revue bibliographique , la deuxième partie présente la méthodologie utilisée pour réaliser ce travail, la troisième partie consiste à présenter les résultats et la quatrième partie porte sur les discussions de ces résultats afin de tirer des conclusions et de dégager les perspectives de cette étude.

## **I. REVUE BIBLIOGRAPHIQUE :**

### **a) Evolution et adaptation des plantes aux changements climatiques**

Les changements climatiques sont définis comme étant des modifications sur le moyen ou long terme de notre environnement et qui ne sont pas sans conséquences sur l'agriculture et le comportement des espèces animales et végétales (Walther *et al.*, 2002).

Ainsi, faces aux aléas climatiques, trois stratégies pourront être adoptées par les espèces : 1) se déplacer (redistribution de l'aire de répartition), 2) tolérer (plasticité) et 3) s'adapter.

Bien qu'il soit difficile d'identifier précisément le facteur climatique limitant, plusieurs études ont néanmoins permis de mettre en évidence des liens directs entre les changements climatiques et certains changements écologiques et évolutifs des espèces (Parmesan, 2006).

Les changements climatiques auront un impact fort sur l'agriculture en termes de redistribution des cultures au niveau mondiale (Skarbø, 2012). Ces modifications d'aire de répartition touchent aussi bien des espèces sauvages que des espèces cultivées. Il est notamment attendu une redistribution mondiale de certaines espèces cultivées comme c'est le cas de la tomate (Silva *et al.*, 2016). Ces auteurs estiment que d'ici l'an 2100, la culture de la tomate en plein champ dans les grandes zones de production telles que l'Amérique centrale et du sud, l'Afrique subsaharienne, l'Inde et l'Indonésie connaîtra une baisse des superficies due aux contraintes climatiques telles que l'augmentation de la température, alors que des zones comme l'Amérique du Nord et l'Europe qui dans le passé n'étaient pas adaptées deviendront des endroits favorables pour sa culture. Cette redistribution pouvant aussi se faire très localement comme pour le maïs où les paysans mexicains se sont adaptés en cultivant leur maïs à des altitudes plus élevées (Skarbø et VanderMolen, 2015). Egalement, on note dans le Moyen Orient le cas du palmier dattier qui autrefois était très cultivé en Arabie Saoudite, connaîtra une baisse de 68% des superficies à cause des variations des températures et en même temps, une expansion des zones favorables à sa culture dans des pays voisins comme l'Israël, la Jordanie et la Syrie (Shabani *et al.*, 2014). D'autres études ont également montré une nouvelle distribution de la production de coton et de blé dans les régions de l'Australie avec une nette diminution des superficies allouées au blé due aux variations de températures (Shabani & Kotey, 2015).

Au-delà de la stratégie d'évitement par un déplacement, des stratégies d'adaptation par le biais de changements phénologiques peuvent se mettre en place. Dans un article de synthèse,

plus de la moitié des espèces (59%) sur les 1598 de diverses cultures 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 ont été faites chez un grand nombre d'espèces comme chez les papillons (Fositer et Shapiro 2003), les amphibiens (Beebee 1995). En effet, la santé et la forme des plantes dépendent principalement de leur réponse à la température, la photopériode et la vernalisation (action du froid sur la dormance des graines, bourgeons entre autres organes), même si d'autres facteurs comme la sécheresse peuvent affecter leurs développement (Visser et Both, 2005; Straile *et al.*, 2015). Leur sensibilité à la photopériode ou la vernalisation les protège 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 and Menzel, 2002; Menzel, 2003). Une analyse de 16 espèces de plantes en Europe entre 1959-1993 met en évidence l'allongement du cycle de presque 11 jours (Menzel, 2000, Menzel et Fabian, 1999). Une analyse en Allemagne sur l'avoine de 1959 à 2009 a mis en évidence un avancement de tous les stades phénologiques avec une avancée d'environ 10 jours aussi bien pour la floraison que pour la récolte (Siebert et Ewert, 2012). Une étude sur les phénophases de plusieurs arbres européens menés par Chmielewski et Rötzer (2002) a également montré que le débourrement et la floraison commencera en moyenne 3 jours plus tard par 100 m de dénivelé et 2,4 jours plus tard pour un déplacement de 100 km dans les zones situées au nord, avec de grandes différences entre les années et les saisons de printemps froides ou chaudes. De même, une grande variabilité spatiale d'année en année en l'occurrence des stades phénologiques a été signalée pour les plantes à vocation agricoles sous l'influence des changements climatiques (température) (Van Bussel *et al.*, 2011). Heide (2003) a signalé que le nombre de jours pour l'éclatement des bourgeons pendant la période du printemps était significativement corrélé avec les températures d'automne. Piao *et al.* (2015) ont récemment montré que des conditions plus chaudes pendant la période automne-hiver ralentissaient l'accumulation de froid chez certaines espèces, provoquant ainsi un retard de la levée de la dormance des bourgeons, qui à son tour agit sur la précocité de la floraison. D'autres études ont montré également que la production de fleurs et de pollens diminuent considérablement en cas de déficit de cumul de jours froid (Thompson *et al.*, 1974 ; Kingston *et al.*, 1990). Les changements phénologiques sont souvent une réponse aux conditions climatiques (températures et humidité) des mois précédents mais pas uniquement puisque un nombre grandissant d'études met en évidence l'impact des conditions de la saison d'avant comme

(Sparks *et al.*, 2000) sur le crocus d'automne et par Fitter *et al.* (1995), Luterbacher *et al.* (2007) et Crimmins *et al.* (2010) pour diverses autres espèces de plantes.

Les modifications phénologiques telles que la date de floraison sont des véritables stratégies adaptatives qui permettent d'éviter des stress comme la salinité, les températures extrêmes et la sécheresse (Kazan et Lyons 2015). Néanmoins, il faut également noter que ces changements peuvent avoir des impacts négatifs important notamment au travers des interactions plantes-pollinisateurs. Forrest (2015) a mis en évidence une absence de synchronisation des activités (recherche de nectar ou pollinisation et production de pollen) due à l'augmentation des températures qui pourrait diminuer les taux de pollinisation par conséquent entrainer une baisse de la production. Carroll *et al.* (2001) estiment que l'augmentation de la sécheresse pourrait induire des perturbations majeures sur des activités phénologiques telles que la production de nectar ou la floraison mettant ainsi en danger la survie des plantes et des insectes pollinisateurs. McKinney *et al.* (2012) ont mis en évidence le décalage existant entre les dates de floraison des espèces végétales situées en altitude et l'arrivée des espèces d'oiseaux migratoires qui profitaient souvent de l'apparition de ces ressources saisonnières, ce qui réduit fortement leur succès de nidification et la pollinisation de ces plantes. Une étude de Burkle *et al.* (2013) utilisant un ensemble de données historiques sur une durée de 120 ans montrent que 50% des espèces d'abeilles habitant la forêt de l'Etat d'Illinois ont disparus à cause des changements de phénologies observées chez les espèces végétales du milieu.

Cette capacité de réponses et d'adaptations phénologiques est liée à la diversité génétique (Doi *et al.*, 2010). Doi *et al.* (2010) ont signalé que les variations régionales dans les réponses de la floraison et le débourrement des espèces végétales sont plus élevées chez les plantes à grande diversité génétique. Ainsi, le maintien de la diversité génétique devrait être considéré comme une activité importante pour atténuer les problèmes liés aux changements climatiques. Sultan *et al.* (2013) ont mis en évidence que les variétés « paysannes » photopériodiques et plus diversifiées génétiquement seront moins affectées par les changements climatiques que les variétés améliorées dites « non-photopériodiques ».

#### **b) L'importance des variétés à cycle long et court pour l'adaptation de l'agriculture face aux changements climatiques.**

Compte tenu des incertitudes liées au démarrage et à la fin des saisons des pluies résultant des conséquences du changement climatique, la réussite de la production agricole repose en

partie sur l'utilisation d'espèces ayant des cycles différents permettant de couvrir toute la saison afin de sécuriser la production ou d'augmenter les rendements de productions.

Cette plasticité phénologique peut être augmentée au travers de l'association culturale des variétés à cycle court et à cycle long dans les mêmes parcelles ou dans des parcelles adjacents. Cette technique, bien connue des agriculteurs, a pour but de s'adapter aux changements climatique et d'assurer en même temps des besoins diversifiés en alimentation animale et humaine.

Dans des conditions de culture où la pluviométrie est aléatoire, l'association d'une variété à cycle court et port érigé et d'une variété à port rampant et à cycle long de niébé était plus productive que la culture pure dans les zones nord et centre nord du Sénégal et assurait une stabilité de rendement car offre à la fois une production de graines et de fanes tout en protégeant contre les attaques des insectes et les maladies (Thiaw *et al.*, 1993). Selon Muller *et al.* (2015), dans leur travaux sur le retour du sanio dans le Sine, nous rapportent que les paysans du Sine Saloum au Sénégal indiquent que la culture associée de ces deux variétés de mil (souna et sanio) présente un certain nombre d'avantages à savoir : la possibilité d'avoir des récoltes avec le mil de type souna tout en minimisant les risques liés à la pluviométrie et les ravages causés par les insectes d'une part. D'autre part, le mil souna peut être cultivé dans les sols les plus marginaux contrairement au sanio. De la même manière, ils ont évoqués des avantages complémentaires pour le mil de type sanio qui se résument à travers la qualité alimentaire de ses grains (goût de la farine), la qualité de ses résidus, notamment ses tiges utilisées pour les toitures et les palissades et pour nourrir le bétail.

Dès lors quelque soit les espèces cultivées, l'utilisation simultanée de deux variétés phénologiquement différentes par les producteurs semble constituer une stratégie d'adaptation face aux contraintes climatiques.

## **c) Le cas du mil**

### **1.1 Position systématique et description botanique du mil**

Selon la classification phylogénétique, le mil du nom scientifique *Pennisetum glaucum* [L.] **R. Br** appartient au règne des Plantae, à la division des Magnoliophyta, à la classe des Liliopsida, à l'ordre des Poales, à la famille des Poaceae, à la sous-famille des Panicoideae, à la tribu des Paniceae et au genre *Pennisetum*.

Le mil est une Poaceae (Graminées) à port érigé dont la tige, sans lacunes médullaires (pleine), a une taille qui varie de 50 à 400 cm, selon les variétés (Diop, 1999). Cependant,

dans la zone semi-aride, la longueur de la tige ne dépasse pas 300 à 380 cm, et possède un diamètre de 1 à 2 cm (Amadou, 1994).

Le système racinaire est composé de racines superficielles et des racines qui peuvent s'enfoncer jusqu'à 200 cm dans le sol, ce qui explique l'adaptation de cette plante aux sols dunaires (Boubacar, 1985 ; Sivakumar et Salaam, 1994 ; Alhassane, 2009).

La tige est rigide et présente des entre-nœuds pleins dont ceux de la base sont les plus courts. Les nœuds de la base sont capables de donner des talles primaires, secondaires et tertiaires. Les talles ne sont pas toutes fertiles : 1 à 6 talles par plante parviennent généralement à produire des épis (Denis, 1984).

Les feuilles alternes engainantes et à nervures parallèles s'insèrent sur la tige au niveau des nœuds. Elles possèdent une gaine embrassant la tige et un limbe lancéolé. La nervure principale est bien développée et empêche le limbe de se plier. Le limbe porte des stomates sur ses deux faces (Denis, 1984).

L'inflorescence est constituée d'une panicule apicale très dense et de forme cylindrique. Sa longueur et son diamètre varient selon la variété (15 à 140 cm pour la longueur et 0,5 à 4 cm pour le diamètre) (Bidinger *et al.*, 1982).

La panicule (faux épi) est formée d'un rachis rigide portant les épillets pédonculés et groupés en bouquets. Chaque épillet comprend deux fleurs : la fleur supérieure est hermaphrodite ou femelle, généralement fertile, tandis que la fleur inférieure est mâle et est stérile. En général, il y a quelques jours de décalage entre les floraisons mâles et femelles ; ce qui favorise une fécondation croisée (Denis, 1984).

Le fruit (sous-forme de grain) est un caryopse (de forme globuleuse à elliptique) long d'environ 4 mm et de couleur variable (blanchâtre, jaunâtre ou grisâtre). Les graines de mil sont densément réparties sur l'épi (Denis, 1984).

## **1.2 Cycle de développement**

Le mil, *Pennisetum glaucum*, est une céréale diploïde ( $2n=2x=14$ ) à reproduction allogame. La phase végétative pouvant aller de 0 à plus de 50 jours après semis (JAS), débute lors de l'émergence de la plantule et se poursuit jusqu'à l'initiation de la panicule. Le tallage débute autour de 15 jours après la levée et se poursuit durant 10 à 20 jours chez les variétés précoces et plus tard chez les tardives car restant lié à la date de semis chez les variétés photosensibles (Diallo, 2012). La phase reproductive s'observe souvent aux alentours du 50<sup>ème</sup> au 75<sup>ème</sup> JAS selon les variétés (Maiti et Bidinger, 1981). Elle débute souvent avec la montaison des talles qui s'opère avec un décalage dans le temps.

Ensuite, après l'apparition complète de la panicule, cette dernière développe des épillets sur lesquels émergent des fleurs mâles et femelles et après fécondation des graines. La durée entre la floraison et la fécondation de la panicule est souvent comprise entre cinq à six jours (Maiti et Bidinger, 1981).

La phase de remplissage et de maturation des grains commence après la fécondation des fleurs de l'inflorescence principale. Cette phase présente les étapes suivantes : la phase laiteuse, la phase cireuse ou vitreuse avant de parvenir à la maturité physiologique, environ 20 à 25 jours après la floraison selon les variétés (Maiti et Bidinger, 1981).

### **1.3 Exigences écologiques**

Le mil est une plante qui exige de la chaleur pour son développement, qui supporter des températures élevées, résistant à la sécheresse et qui s'accommoder en général à des sols peu fertiles, à condition qu'ils soient perméables (Van Oosterom *et al.*, 2003). Ainsi, Les températures les plus favorables pour le mil se situent entre 27 et 30 °C. C'est une plante de pleine lumière à jours courts. La quantité ainsi que la répartition des pluies est très importante pour sa culture. Dans les zones de 600 à 1000 mm de pluies, on trouve surtout les mils tardifs contrairement aux mils précoces rencontrés dans les zones de 350 à 600 mm de pluies. Le mil peut résister à la sécheresse en début de végétation mais ses besoins en eau sont importants durant la période de montaison jusqu'à la maturité avec un maximum à l'épiaison. Une sécheresse au cours de la montaison, de la floraison et de la maturation peut entraver la formation des grains. Cependant, c'est une céréale plus résistante à la sécheresse que le sorgho et le maïs et peu exigeante sur la nature du sol (Moumouni, 2014).

### **1.4 Les Contraintes à la production du mil**

Dans les pays sahéliens, plus particulièrement au Sénégal de nombreuses contraintes ont été identifiées comme facteurs limitant la production du mil. Parmi celle-ci nous avons :

- La pression démographique qui a entraîné une diminution de la durée voir même absence de jachère et, conséquemment la fertilité des sols et l'exploitation de terres les plus marginales conduisant à la baisse des rendements (Bouzou, 2009).
- Les contraintes abiotiques telles les aléas climatiques (pluies et températures variables et vents violents) qui peuvent aussi provoquer des baisses de production chez le mil.
- Les contraintes biotiques : Ce sont notamment les ravageurs ou insectes des cultures (des lépidoptères, des coléoptères, des hétéroptères et des orthoptères), les maladies fongiques (le mildiou, le charbon du mil, l'ergot, la pyriculariose), les adventices (*Striga hermonthica*) et les oiseaux granivores (*Ploceus cuculatus*, *Quelea-quelea*, ...)

## 1.5 Origine, répartition géographique et diversité des formes cultivées

L'histoire évolutive du mil est de nos jours relativement bien connue. Le mil trouve son origine dans le continent africain. Des études archéologiques ont mis en évidence des restes de mil cultivé en Afrique de l'Ouest datant de 3000 ans avant J-C dans la région du Sahel (Höhn *et al.*, 2007, Kahlheber *et al.*, 2009, Manning *et al.*, 2011). Ces données archéologiques ont été confirmées par des données génétiques qui estiment que la domestication du mil a eu lieu au moins il y a 4500 ans (Cloutault *et al.*, 2012) au centre du Sahel (Oumar *et al.*, 2008, Dussert *et al.*, 2015).

De nos jours, la culture du mil se pratique sur les 5 continents même si les superficies emblavées, les rendements obtenus et les utilisations diffèrent d'un continent à un autre mais aussi d'un pays à un autre. Septième céréale cultivée, le mil représente une culture vivrière de base dans les zones austères et semi-arides car c'est une céréale qui s'adapte bien aux terres légères, à la sécheresse et aux fortes températures. Cette plante est cultivée dans les régions arides et semi-arides, principalement de l'Inde et de l'Afrique de l'Ouest (Sehgal *et al.*, 2012) surtout pour son grain qui est essentiellement utilisé (80-90%) pour l'alimentation humaine au Sahel (Van Duivenbooden et Abdoussallam, 2002). Ses sous-produits, telles que les tiges et les feuilles, sont des aliments appréciés par le bétail et servent aussi à divers usages domestiques (construction des cases, hangars et greniers, confection des palissades et lits, fabrication du fumier et du compost, etc.) en milieu rural (Rocafrimi, 2002).

En Afrique de l'ouest et au Sénégal, les variétés cultivées sont classées en deux groupes, selon leur cycle (durée de développement) : les variétés précoces dans les zones les plus sèches et ceux tardives dans les zones humides avec une bonne pluviométrie compte tenu de leur besoin en eau élevé (Bezançon *et al.*, 2009),

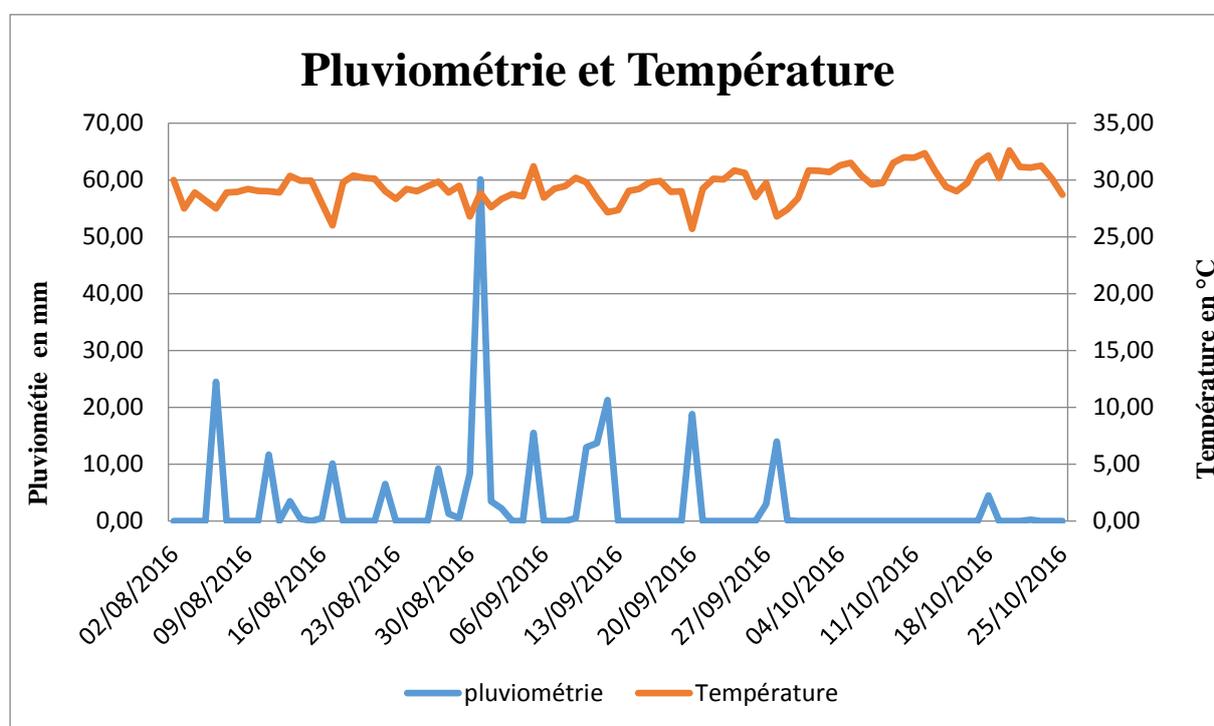
En outre, cette différence entre mils précoces et tardifs est vue sous l'angle de la sensibilité ou non à la photopériodicité des variétés (Belliard et Pernes, 1985, Haussmann *et al.*, 2007; Clerget *et al.*, 2007). Cependant, d'autres études (Niangado, 2001, Allinne *et al.*, 2008) suggèrent une évolution des tardives vers le caractère précoce causée par des flux de gènes importants et liés aux pratiques agricoles ou aux conditions du milieu. Des études génétiques menées en Afrique de l'Ouest (Dussert *et al.*, 2015) et au Sénégal (Diack *et al.*, 2017) montrent en effet une faible différenciation génétique entre ces deux groupes. Ainsi, l'exploitation et l'existence encore dans le temps de cette diversité de mil reposent sur la conservation faites par les paysans. Ces derniers gardent leurs variétés traditionnelles qui constituent un matériel précieux pour la richesse génétique, notamment pour des caractères de rusticité.

Des travaux sur des aspects tels que la diversité génétique et l'adaptation des mils au Sénégal et dans le Sahel ont été effectués par un certain nombre d'auteurs. Ainsi, les études de Hausmann *et al.* (2007), portant sur les mécanismes d'adaptation des variétés traditionnelles de mil ouest africain, révèlent qu'il y a une différence minimale de 16 jours et maximale de 39 jours dans les dates de floraison des mils cultivés en Afrique de l'Ouest et que la sensibilité à la photopériodicité est corrélée à la date de semis. Les travaux de Pucher *et al.* (2015) portant sur la caractérisation agromorphologique de 360 accessions de mil de l'Afrique de l'ouest et du centre ont montré l'existence d'une grande diversité génétique au sein même des pays partageant les mêmes zones agroécologiques. Des études ont également porté sur la taille des plantes (Clerget, 1999), d'autres sur la couleur des graines (Murty *et al.*, 1995). Sy *et al.* (2015) ont caractérisé 336 accessions de la collection de mils locaux du Sénégal et indiquent l'existence d'une grande diversité de ses variétés. Néanmoins cette collection était principalement constituée de mil précoce ou souna. Diallo (2012) a caractérisé les cycles de développement de dix (10) variétés de mil (4 tardives et 6 précoces) de diverses origines sur trois sites situés le long d'un gradient latitudinal au Sénégal, et l'auteur nous rapporte que la durée entre le semis et l'apparition de la feuille drapeau des plantes de mil dépend de la latitude et de la date de semis et que la variation de la durée du cycle est beaucoup plus marquée chez les variétés à cycles long. D'autres efforts qui ont porté sur la connaissance des caractères morphologiques et physiologiques de résistance du mil à la sécheresse mettent en évidence, l'hétérogénéité phénotypique et la plasticité morphologique (Winkel et Do 1992).

## II. MATERIEL ET METHODES

### 2-1. Présentation de la zone d'étude

L'essai a été conduit au Centre National de Recherche Agronomique (CNRA/ISRA) de Bambey (14°42'N, 16°28'W). Le climat est de type soudano-sahélien, caractérisé par la succession d'une saison sèche (d'octobre à juin) et d'une saison pluvieuse (de juin à octobre) avec une faible pluviosité et une forte évaporation. La saison des pluies débute généralement dans la dernière décade de juin atteint un maximum en août et se termine dans la première décade d'octobre. Pour l'année 2016, la température été en moyenne de 30° C durant toute l'hivernage alors que la pluviométrie n'a presque pas dépassé les 20 mm durant les trois mois si ce n'est que pendant la première semaine du mois de septembre où elle a atteint 60 mm (Figure 1).



**Figure 1.** Répartition hebdomadaire de la pluviométrie et de la température enregistrée au CNRA de Bambey pendant l'hivernage en 2016 (CNRA, 2016)

### 2.2. Matériel végétal

Le matériel végétal utilisé est composé de 141 accessions dont 92 de type souna et 49 sanio collectées à travers les zones milicoles de Niakhar (dans le bassin arachidier du Sénégal) par le biais d'enquêtes menées auprès des paysans. Pour chaque paysan enquêté, il a été collecté 1 à 3 épis par variété de mil (souna ou sanio) dans son grenier. Les individus de chaque accession proviennent d'un même épi.

### 2.3. Dispositif expérimental

Le dispositif est en blocs complets à un facteur (la variété) et à 3 répétitions (Figure 2). L'unité de répétition est une parcelle d'une ligne de 30 m (30 poquets/ligne), soit trois accessions par ligne avec 10 individus par accessions ce qui donne au total 48 lignes par blocs (soit 4290 individus sur les 3 blocs). Les écartements sont de 0,9 m entre les lignes et 0,9 m entre les poquets sur la même ligne. Les blocs sont distants entre eux de 1,5 m et sont entourés par 5 à 6 lignes de bordures constituées de plantes de mil de la variété souna 3 (semé bien avant les autres accessions).

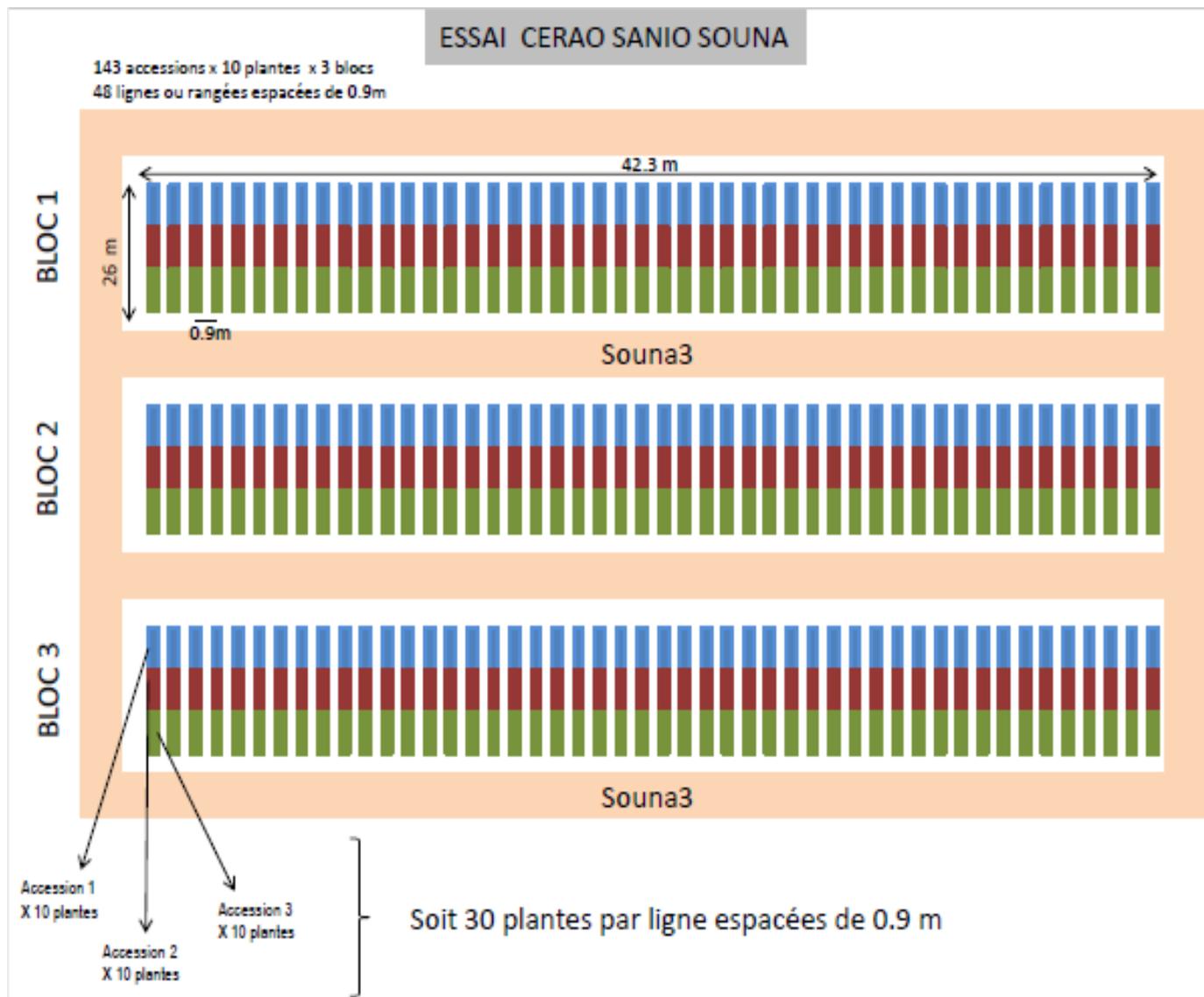


Figure 2: schéma du dispositif expérimental

## 2.4. Conduite de l'essai

L'essai a été conduit suivant le protocole conçu par le projet et les principales opérations culturales effectuées sont énumérées ainsi :

### 2.4.1. Opérations avant le semis :

- ❖ **Labour profond (plus de 15 cm)** : cette opération a été effectuée à sec, à l'aide d'un tracteur sur une profondeur de plus de 15 cm.
- ❖ **Hersage et plannage** : Cette pratique consiste à briser les mottes de terre à l'aide d'une herse rotative afin de créer un bon lit de semis.
- ❖ **Rayonnage ou traçage des sillons** : Cette activité consiste à réaliser les lignes et les points de semis à l'aide d'un rayonneur métallique pour s'assurer de l'alignement des accessions après la levée afin de faciliter les opérations d'entretiens.

### 2.4.2. Du semis à la maturité

- ❖ **Semis**: le semis a été effectué le 02 août 2016 en sol humide, en raison d'une pincée de grains par poquet. Les grains semés ont été traités sur chaque trou avec un fongicide du nom de Thirame.

- ❖ **Fertilisations**

- Engrais de fond** : Il est constitué de matière organique d'origine animale en petite quantité qui était mélangé par griffage dans le sol au moment du labour.

- Engrais de couverture** : un apport de NPK a été effectué au moment du premier démariage à 3 plants, à 15 JAL en raison de 150kg/ha, soit une quantité de 43.2 kg sur tout l'essai. Ensuite, l'urée (46-0-0) a été apportée en deux tranches de 50 kg/ha au moment de la montaison à 32 JAS et une semaine plus tard.

- ❖ **Entretiens et opérations culturales**

- Démariage** : Il consiste à diminuer le nombre de plants après la levée. Ainsi, un premier démariage à 3 plants par poquet a eu lieu à 15 JAL, puis une semaine plus tard, on a effectué le second démariage à 1 plant par poquet.

- Traitements phytosanitaires** : Deux traitements phytosanitaires ont été effectués avec du Malathion (insecticide) en raison de 750 EC à l'aide d'un pulvérisateur à dos de 16 L pour lutter contre les chenilles défoliateurs (*Spodoptera spp*, et *Amsacta moloneyi*), les cantharides et les cécidomyies du mil.

- Sarclobinages** : les opérations de sarclobinages ont été effectuées régulièrement tout au long du cycle à l'aide de la houe sine et du "hiler", pour maintenir propre les parcelles et d'éviter les effets de compétitions causées par les adventices.

**-Irrigation** : une irrigation d'appoint s'effectuée chaque semaine avec des asperseurs, si toutefois l'humidité du sol est en dessous de 20 mm<sup>3</sup> pour garantir les conditions maximales d'humidité aux plantes.

**-Gardiennage** : des agents ont été mobilisés pour surveiller l'essai contre les oiseaux et les rongeurs qui déterrent les graines au semis, mais également de chasser les oiseaux granivores dès le début de remplissage des grains jusqu'à la récolte.

**-Récolte** : elle est effectuée à l'aide d'un sécateur pour faciliter la coupe des épis et des talles principaux afin de permettre les mesures.

**-Séchage des épis** : il est effectué en deux phases, juste après la récolte, les épis ont été séchés au soleil pendant une semaine ou plus puis introduits au four (local équipé de source lumineuse) du CNRA à 73° C environ, pendant une semaine aussi.

**-Battage** : il est réalisé de manière manuelle par traitement et individuellement sur des sacs en tissus pour tous les épis de chaque accession.

#### 2.4.3. Observations et mesures

Le suivi phénologique de chacune des 141 accessions a été effectué pendant toute la durée du cycle (du 02 août au 23 décembre 2016). Les observations consistent essentiellement à noter et/ou identifier:

- 1 **Le brin maître** : Au niveau de chaque poquet le brin maître est identifié et marqué par un tissu.
- 2 **La date de la 1<sup>ère</sup> épiaison sur brin maître**: Elle consiste à noter la date de la première sortie d'épis visible sur la tige principale;
- 3 **La présence/absence d'aristation de l'épi** : Cette observation consiste à noter la présence ou l'absence des poils sur l'épi,
- 4 **La longueur du brin maître** : elle a été mesurée en cm à l'aide d'un ruban à mètre à partir du sol jusqu'au sommet de l'épi du brin maître de chaque plante au moment de récolter ;
- 5 **Le diamètre du brin maître** : il est déterminé au moment de la récolte au niveau du 1<sup>er</sup> nœud à l'aide d'un ruban à mètre en prenant la circonférence puis par calcul pour ramener cette mesure en circonférence au diamètre;
- 6 **Le nombre de talles utiles** : il correspond au nombre de talles fertiles, c'est à dire ceux qui ont donné des épis, déterminé par comptage.
- 7 **Le nombre de talles stériles** : Par comptage, le nombre de talles non fertiles ou sans épis sont déterminés;

- 8 **Le Ratio de fertilité** : Il est calculé en faisant le rapport entre nombre de talles utiles sur nombre de talles totales
- 9 **La longueur de l'épi du brin maître** : elle a été mesurée en cm à parti de la base jusqu'au sommet de l'épi à l'aide d'un ruban à mètre au moment de la récolte ;
- 10 **Le diamètre de l'épi du brin maître**: il est déterminé en cm à partir du milieu de l'épi à l'aide d'un ruban mètre pour déterminer la circonférence puis par calcul déterminer le diamètre

## 2.5 Analyse statistique

Les analyses statistiques ont été réalisées avec le logiciel R (R development core team 2016) et les packages suivant ade4 (Dray et Dufour, 2007), ggplot2 (Wickham, 2009), agricolae (Mendiburu, 2016), lme4 (Bates *et al.*, 2016), metap (Dewey, 2017) et adegenet (Jombart *et al.*, 2016).

Nous avons d'abord réalisée une analyse en composante principale (ACP) pour mettre en évidence des regroupements potentiels.

Pour chaque variable mesurée, nous avons testé la normalité de la variable à l'aide d'un Shapiro test (Shapiro & Wilk, 1965). Afin d'atteindre la normalité, nous avons testé différentes transformation ( $1/x$  ;  $\text{Log}(x)$ ,  $\sqrt{x}$ ), et nous avons retenu la meilleure. Puis, nous avons testés deux modèles linéaires pour analyser les données:

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

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

$y$  étant la variable étudiée,  $m$  la moyenne totale,  $a_h$  l'effet variété,  $b_j$  l'effet bloc et les interactions (\*). Pour le modèle 2, nous avons testés l'effet accessions  $s_i$  emboité dans l'effet bloc. Pour chaque modèle, nous avons testé la normalité des résidus avec un Shapiro test (Shapiro & Wilk, 1965). Les modèles ont été comparés avec entre eux par l'Akaike Information Criterion (AIC, Akaike, 1974) et le Critère d'Information Bayésien (BIC, Schwarz, 1978).

Dans la plupart des cas, la normalité n'a pas été atteinte par nos modèles. Nous avons donc testé les effets blocs en utilisant un test de Kruskal-Wallis (Kruskal et Wallis, 1952) et un test de Wilcoxon (Wilcoxon, 1945) pour les échantillons appariés. Les p-values des différents tests ont été combinées avec la méthode de Fischer pour estimer la p-value globale.

### III. RESULTATS

Les données obtenues de cette présente étude sont issues des mesures effectuées sur 4023 plantes de mils des deux groupes variétaux souna et sanio cultivées au Sénégal durant la saison des pluies à la station de l'ISRA-CNRA de Bambey.

#### 3.1 Corrélation entre les variables :

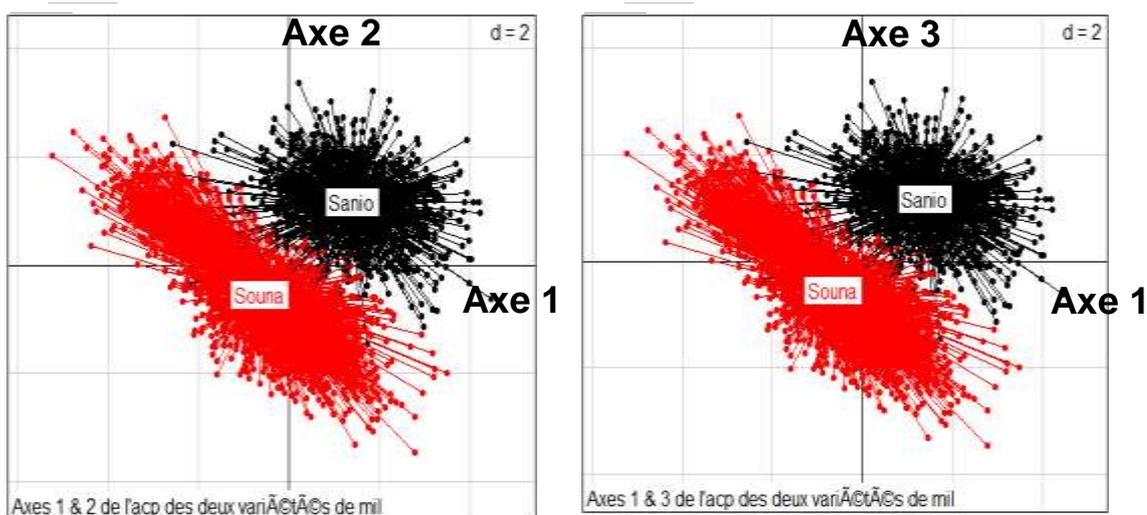
Les résultats globaux sur la corrélation entre les variables indiquent que les variables diamètres des brins et longueurs des brins maîtres présentent la plus forte corrélation moyenne ( $> 0.35$ ) par rapport aux autres variables. Il ressort de ces résultats que la corrélation entre deux variables révèle que les corrélations positives les importantes sont obtenues par ordre entre le diamètre des brins et celui de l'épi (0,62), épiaison et longueur du brin (0,61), longueur du brin et diamètre du brin (0,49) et épiaison et diamètre du brin (0,44). Les corrélations en relation avec la fertilité et les autres paramètres mesurés sont négatives ainsi que la corrélation entre l'épiaison et la longueur de l'épi avec les valeurs suivantes : fertilité et diamètre de l'épi (-0,33), fertilité et longueur de l'épi (-0,24), fertilité et diamètre du brin (-0,19) et fertilité et épiaison (-0,06), épiaison et longueur d'épi (-0,23).

Tableau 1: Niveau de corrélation entre les différentes variables

	Epiaison	Long. brin	Diam. brin	Fertilité	Long. épi	Diam. épi
Epiaison						
Long. Brin	<b>0.61</b>					
Diam. Brin	0.44	<b>0.49</b>				
Fertilité	- 0.06	0.00	- 0.19			
Long. Epi	- 0.23	0.14	0.24	-0.24		
Diam. Epi	0.27	0.23	<b>0.62</b>	<b>-0.33</b>	0.30	

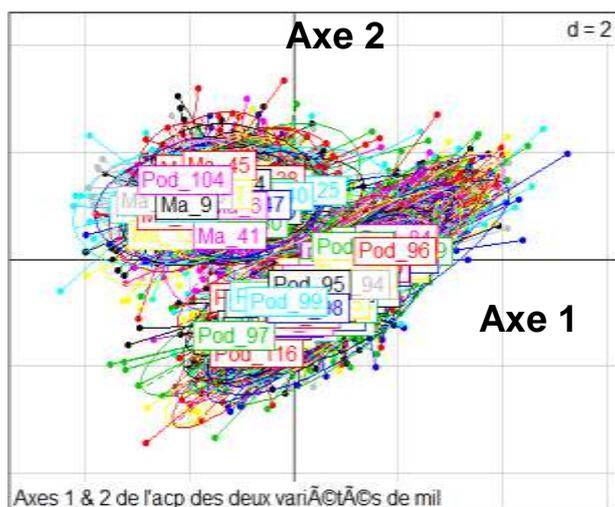
#### 3.2 Analyse en Composantes Principales (ACP)

Les résultats de l'ACP montrent que les deux premiers axes expliquent 41 % et 24% respectivement de l'inertie. L'analyse de ces résultats permet de différencier morphologiquement les deux variétés à savoir le mil tardif sanio et le mil précoce souna (Figure 3). Les principales variables qui contribuent à l'axe 1 sont le diamètre du brin maître et le diamètre de l'épi (Tableau 2). Pour l'axe 2, les principales variables sont la longueur de l'épi et l'épiaison. La fertilité contribue principalement à l'axe 3 de l'ACP.



**Figure 3:** ACP entre les deux groupes de mils A : axes 1 & 2 et B : axes 1 & 3

Les résultats de la figure 4 montrent qu'au sein de chaque groupe les accessions ne sont pas différenciées entre elles.



**Figure 4 :** ACP entre les accessions de mil axes 1 & 2

Le tableau 2 indique les contributions des variables suivant les axes 1, 2, 3 de l'ACP. Les principales variables qui contribuent à l'axe 1 sont le diamètre du brin maître (30 %) et le diamètre de l'épi (23%) (Tableau 2). Pour l'axe 2, les principales variables sont la longueur de l'épi (34%) et l'épiaison (26%). La fertilité contribue principalement à l'axe 3 (46 %) de l'ACP.

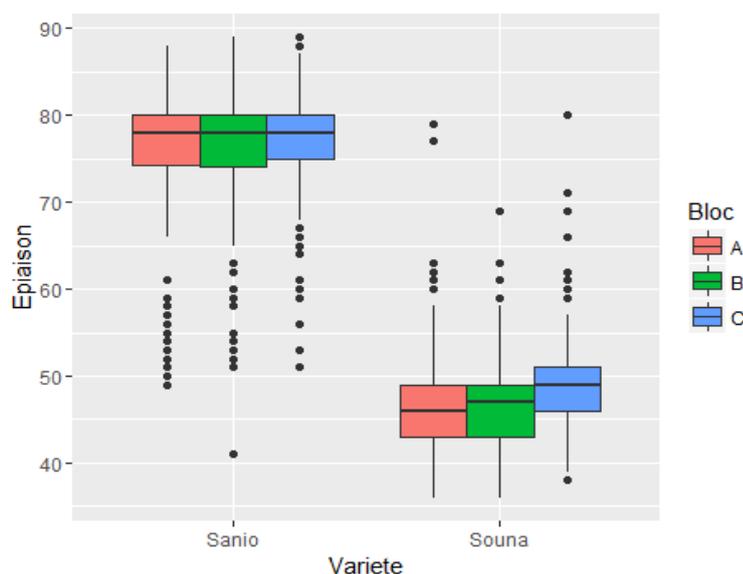
**Tableau 2:** Contribution de chaque variable aux trois composantes principales de l'ACP

	CS1	CS2	CS3
<b>Epiaison</b>	0.18	<b>0.26</b>	0.06
<b>Long. brin</b>	0.21	0.11	0.12
<b>Diam. brin</b>	<b>0.30</b>	0.00	0.01
<b>Fertilité</b>	0.05	0.21	<b>0.46</b>
<b>Long. Epi</b>	0.04	<b>0.34</b>	0.34
<b>Diam. Epi</b>	<b>0.23</b>	0.08	0.02

### 3-3- Résultats obtenus sur les observations

#### 3-3-1-Epiaison sur les brins maîtres

La figure 5 et le tableau 9 montre la distribution des résultats de l'épiaison pour chacun des groupes et des blocs. Ces résultats montrent que chez les sanio, l'épiaison se fait en moyenne au 77<sup>ème</sup> jour  $\pm$  6 jours après le semis et chez les accessions de mil souna au 47<sup>ème</sup> jour  $\pm$  4 jours (tableau 9). On note une variabilité de l'épiaison chez le mil souna avec un possible effet du bloc C qui sera vérifié dans les modèles ci-dessous.



**Figure 5.** Boxplot de l'épiaison des accessions du mil souna et sanio

Les résultats sur les modèles linéaires testés, indiquent que le 2<sup>ème</sup> modèle semble le plus adéquat, néanmoins la normalité des résidus n'est pas atteinte (annexe 1 et tableau 3). Les résultats de ce modèle 2 montrent un effet de la variété ( $p = 2.2e^{-16}$ ), un effet bloc ( $p = 2.2e^{-16}$ )

et un effet de l'accession au sein des blocs ( $p = 2.2e-16$ ). Cela signifie qu'*a priori* il existe une forte variabilité au sein des blocs et entre les accessions.

Des tests non paramétriques ont révélés un effet bloc significatif à partir du test de Kruskal-Wallis (chi-squared = 45.786,  $df = 2$ ,  $p\text{-value} < 2.2e-16$ ). Les analyses par bloc de l'effet des variétés ont montré des effets significatifs dans chacun des blocs, ce qui aboutit à une statistique combinée significative (Fischer combined,  $chisq = 216.3174$  avec  $df = 6$  et  $p = 6.344411e^{-44}$ ).

**Tableau 3.** Modèles linéaires testés sur l'épiaison avec la p-value du Shapiro test des résidus du modèle, valeurs de AIC et de BIC

	Variable	R <sup>2</sup> ajustée	Normalité des résidus	AIC	BIC
<b>Modèle 1:~Variété*Bloc</b>	1/Epiaison	0.8483	2.2e-16	-39075.42	-39031.51
<b>Modèle 2:~Variété + Bloc/Accession</b>	1/Epiaison	0.8848	2.2e-16	-39759.15	-37106.07

En conclusion, il existe une différence significative avec un écart de 30 jours entre les variétés de mil sanio et souna pour la date d'épiaison.

### 3-2-2- Aristation de l'épi

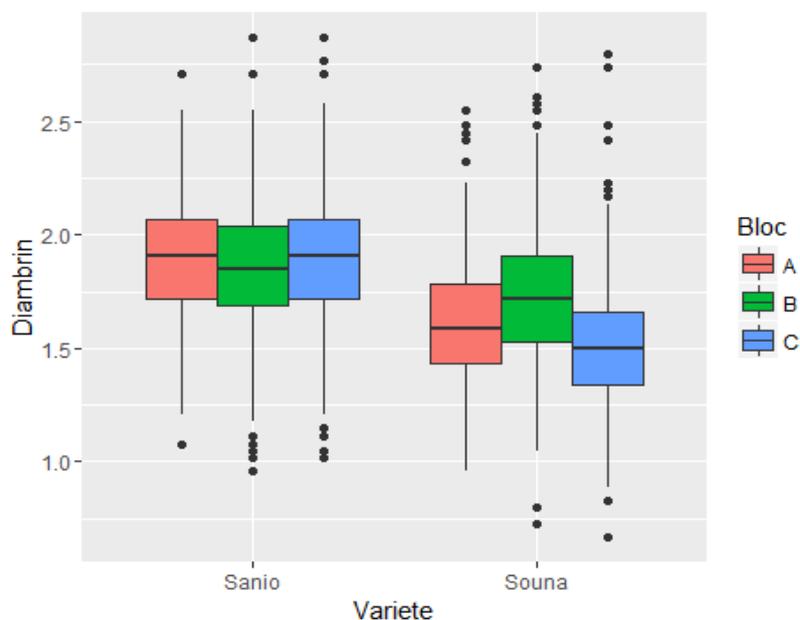
L'aristation est estimée à 99.84% soit 1338 sur les 1340 individus chez le mil de type sanio, alors que chez le mil souna elle est de 2%, soit 51 sur les 2683 individus observés (Tableau 9).

## 3-4- Résultats obtenus sur mesures

### 3-4-1- Paramètres de croissance

#### 3-4-1-1- Diamètre du brin maître

Les résultats sur le diamètre des brins sont présentés dans la figure 6 et le tableau 9. Le diamètre moyen des brins du mil sanio est de  $1.88 \pm 0.26$  cm alors qu'il est de  $1.60 \pm 0.25$  cm pour les accessions de type souna.



**Figure 6.** Boxplot du diamètre des brins des accessions de mil souna et sanio

Les résultats sur les deux modèles linéaires testés présentent un  $R^2$  ajusté relativement faible (tableau 4). Ces résultats révèlent que le 2<sup>ème</sup> modèle semble le plus adéquat, même si le test de la normalité des résidus n'est pas atteint (annexe 2 et tableau 4). L'analyse des résultats du modèle 2, montrent qu'il y a un effet de la variété ( $p = 2.2e^{-16}$ ), un effet bloc ( $p = 2.2e^{-16}$ ) et un effet de l'accession au sein des blocs ( $p = 2.2e^{-16}$ ). Cela signifie qu'a priori il existe une forte variabilité au sein des blocs et entre les accessions.

Les tests non paramétriques ont été réalisés et ont montré un effet bloc significatif (test de Kruskal-Wallis chi-squared = 140.31, df =2, p-value <  $2.2e^{-16}$ ). Les analyses par bloc de l'effet des variétés ont montré des effets significatifs dans chacun des blocs, ce qui aboutit à une statistique combinée significative (Fischer combined chisq = 216.3174 avec df = 6 et  $p = 6.344411e^{-44}$ )

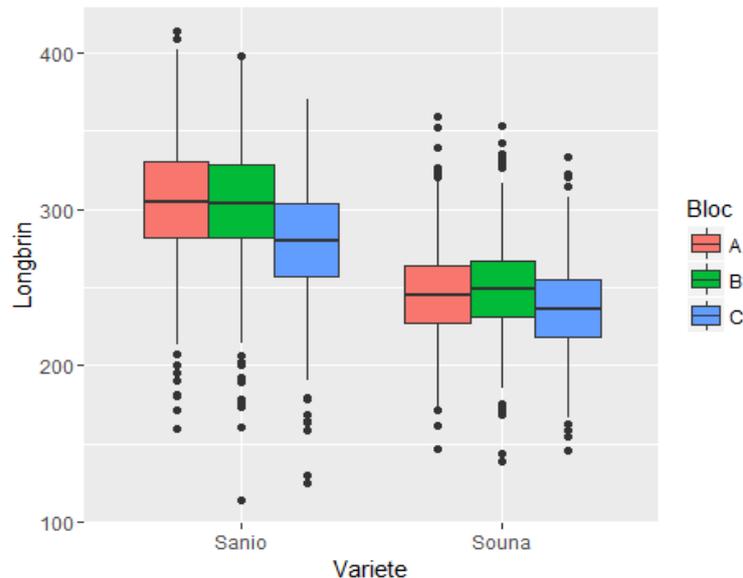
**Tableau 4.** Modèles linéaires testés sur le diamètre du brin avec la p-value du Shapiro test des résidus du modèle, valeurs de AIC et de BIC

	Variable	$R^2$ ajusté	Normalité des résidus	AIC	BIC
<b>Modèle 1: Variété*Bloc</b>	Sqrt(Diambrin)	0.241	$2.2e^{-16}$	-6872.1421	-6828.2897
<b>Modèle 2: Variété + Bloc/Accession</b>	Sqrt(Diambrin)	0.4312	$2.2e^{-16}$	-7601.1020	-4951.1674

En définitive, nous pouvons dire que la différence du diamètre des brins entre les variétés de mil sanio et souna tourne autour de 0.3 cm. Néanmoins les écart-types étant du même ordre, cette mesure ne semble pas la plus pertinente pour discriminer les deux groupes de variétés.

### 3-4-1-2- Longueur du brin maître

Les résultats sur la longueur des brins maîtres sont consignés dans la figure 7 et le tableau 9. L'analyse globale de ces résultats révèle une variabilité de la longueur des brins aussi bien chez les accessions de souna que celles de sanio avec des brins plus courts notés dans le bloc C (figure 7). Il ressort aussi de ces résultats que chez les accessions de type sanio, la longueur moyenne des brins est de  $295 \pm 38$  cm de long contre  $244 \text{ cm} \pm 27$  cm pour les accessions de type souna.



**Figure 7.** Boxplot longueur des brins des accessions de mil souna et sanio

Les résultats de  $R^2$  ajusté sont toujours meilleurs pour les modèles 2 mais moins importants que ceux de  $R^2$  ajusté obtenus à l'épiaison (tableau 3). Il ressort de ces résultats que la normalité des résidus n'est pas atteinte (annexe 3 et tableau 5). Les résultats du modèle 2, illustrent un effet de la variété ( $p = 2.2e^{-16}$ ), un effet bloc ( $p = 2.2e^{-16}$ ) et un effet de l'accession au sein des blocs ( $p = 2.2e^{-16}$ ). Cela signifie qu'a priori il existe une forte variabilité au sein des blocs et entre les accessions. Si on se réfère au modèle 1, l'effet bloc est principalement lié au bloc C et son interaction avec la variété souna ( $p = 0.00054$ )

Les tests non paramétriques montrent un effet bloc significatif (Kruskall-Wallis chi-squared = 115.73,  $df = 2$ ,  $p$ -value  $< 2.2e^{-16}$ ). Les analyses par bloc de l'effet des variétés ont montré des effets significatifs dans chacun des blocs, ce qui aboutit à une statistique combinée significative (Fischer combined chisq = 216.3174 avec  $df = 6$  et  $p = 6.344411e^{-44}$ ).

**Tableau 5.** Modèles linéaires testés sur la longueur du brin avec la p-value du Shapiro test des résidus du modèle, valeurs de AIC et de BIC

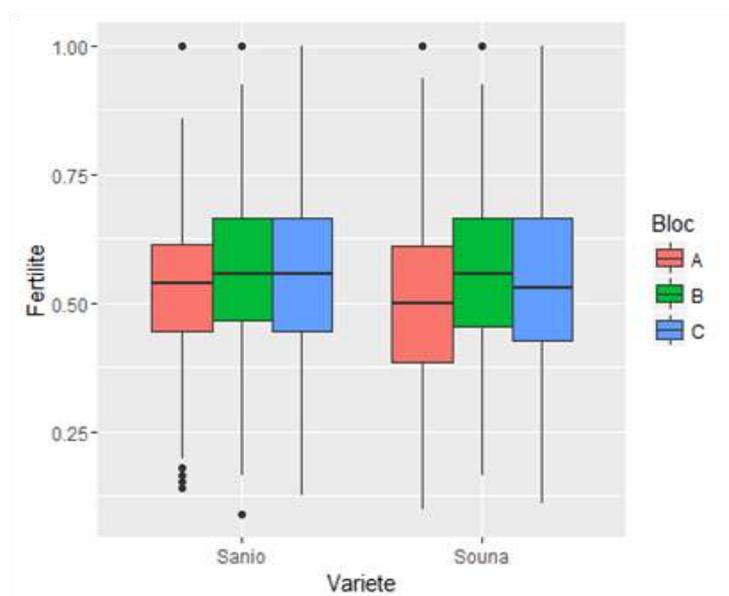
	Variable	R <sup>2</sup> ajusté	Normalité des résidus	AIC	BIC
<b>Modèle 1:~Variété*Bloc</b>	Longbrin	0.4074	2.2e <sup>-16</sup>	37774.791	37818.662
<b>Modèle 2:~Variété + Bloc/Code</b>	Longbrin	0.5829	2.2e <sup>-16</sup>	37014.117	39445.140

En somme, nous notons que les accessions du mil sanio sont plus hautes d'environ 50 cm que celles de type souna.

### 3-5-2- Paramètres de rendement

#### 3-5-2-1- Ratio de fertilité

Les résultats sur la fertilité sont consignés dans la figure 8 et le tableau 9 qui montrent la distribution des données pour chacun des groupes et des blocs. L'analyse de cette figure montre que Chez les sanio, le ratio de fertilité équivaut en moyenne à  $0.54 \pm 0.14$  et chez le mil souna il est de  $0.54 \pm 0.16$  (Tableau 14).



**Figure 8.** Boxplot fertilité des accessions de mil souna et sanio

Les résultats sur la fertilité des deux modèles linéaires testés, on indiqués que le R<sup>2</sup> ajusté est faible. Le 2<sup>ème</sup> modèle semble le plus adéquat même si la normalité des résidus n'est pas atteinte (annexe 4 et tableau 6). L'analyse des résultats de ce modèle 2 montrent un effet bloc ( $p = 2.2e-16$ ) et un effet de l'accession au sein des blocs ( $p = 2.2e-16$ ). Mais pas d'effet de la variété.

Les tests non paramétriques révèlent aussi un effet bloc significatif chez les deux variétés (Kruskall-Wallis chi-squared = 74.309, df = 2, p-value < 2.2e<sup>-16</sup>).

Les analyses par bloc de l'effet des variétés ont montré un effet significatif seulement sur le bloc A, néanmoins ceci aboutit à une statistique combinée significative faible (Fischer combined chisq = 18.62441 avec df = 6 et p = 0.004847291)

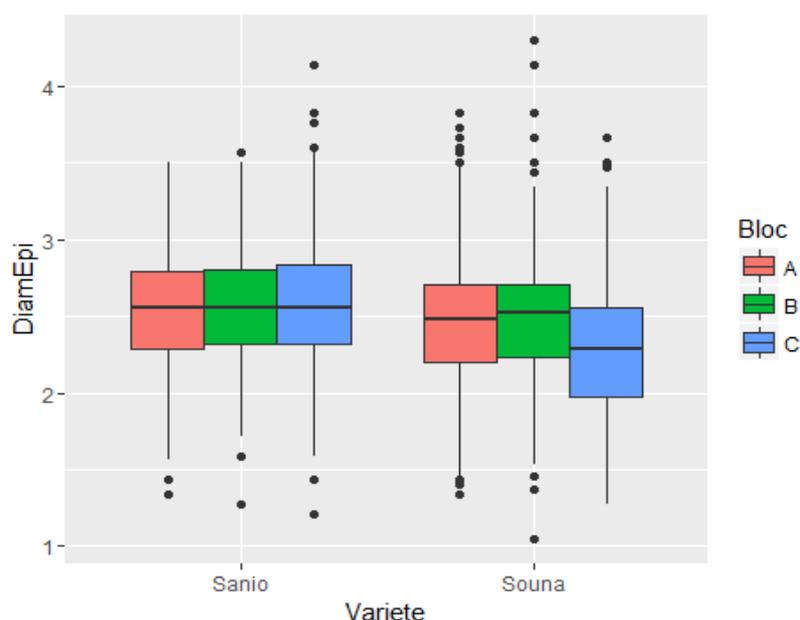
**Tableau 6.** Modèles linéaires testés sur la fertilité avec la p-value du Shapiro test des résidus du modèle, valeurs de AIC et de BIC

	Variable	R <sup>2</sup> ajustée	Normalité des résidus	AIC	BIC
<b>Modèle 1:</b> ~Variété*Bloc	sqrt(Fertilité)	0.01978	2.2e-16	-6109.170	-6065.277
<b>Modèle 2:</b> ~Variété + Bloc/Code	sqrt(Fertilité)	0.1631	2.2e-16	-6335.983	-3689.821

En conclusion, il n'existe pas de différence significative entre les variétés de mil sanio et souna pour la fertilité.

### 3-5-2-2- Diamètre de l'épi du brin maître

La figure 9 montre les résultats des diamètres des épis. L'analyse globale de cette figure montre que les résultats du mil souna sont très variés avec la valeur la plus faible de 2, 28cm. Il ressort aussi de ces résultats que chez les sanio, le diamètre moyen des épis est égal à  $2.55 \pm 0.35$ cm contre  $2.38 \pm 0.41$  cm chez les souna.



**Figure 9.** Boxplot diamètre des épis des accessions de mil souna et sanio

Sur les deux modèles linéaires testés, le R<sup>2</sup> ajusté est faible. Les résultats du 2<sup>ème</sup> modèle semble le plus adéquat même si la normalité des résidus n'est pas atteint (annexe 5 et tableau 7). D'après les résultats de ce modèle 2, nous avons des effets de variété ( $p = 2.2e^{-16}$ ), de bloc ( $p = 2.2e^{-16}$ ) et d'accession au sein des blocs ( $p = 2.2e^{-16}$ ). Cela montre l'existence d'une forte

variabilité au sein des blocs et entre les accessions. Si l'on se réfère au modèle 1, il est noté un effet de l'interaction du bloc C avec la variété souna.

Les tests non paramétriques révèlent un effet bloc significatif (Kruskal-Wallis chi-squared = 57.754, df =2, p-value = 2.876 e<sup>-13</sup>). Les analyses par bloc de l'effet des variétés ont montré des effets significatifs dans chacun des blocs, ce qui aboutit à une statistique combinée significative (Fischer combined chisq = 110.1942 avec df = 6 et p = 1.856192e<sup>-21</sup>)

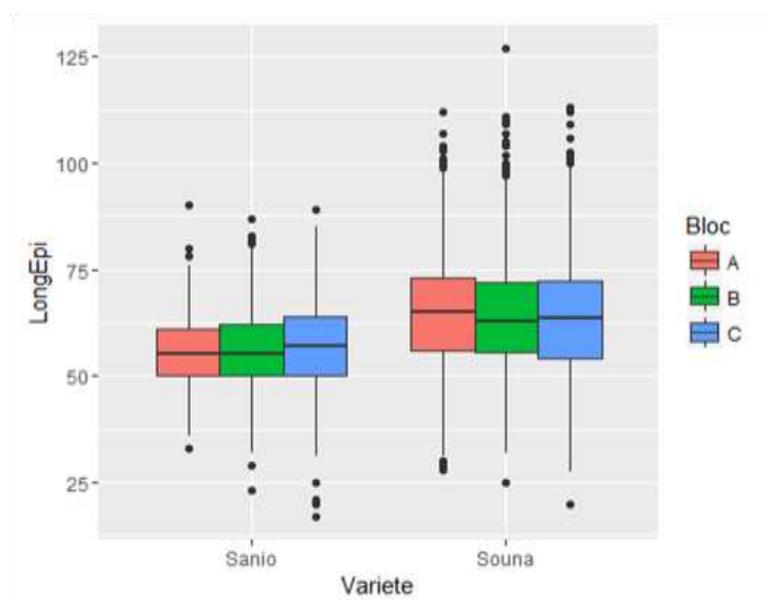
**Tableau 7.** Modèles linéaires testés sur le diamètre de l'épi avec la p-value du Shapiro test des résidus du modèle, valeurs de AIC et de BIC.

	Variable	R <sup>2</sup> ajusté	Normalité des résidus	AIC	BIC
<b>Modèle 1:~Variété*Bloc</b>	sqrt(DiamEpi)	0.06146	2.2e-16	-4713.298	-4669.509
<b>Modèle 2:~Variété + Bloc/Code</b>	sqrt(DiamEpi)	0.219	2.2e-16	-5029.429	-2383.323

En conclusion, il existe une différence de l'ordre de 0.2 cm entre les variétés de mil sanio et souna pour le diamètre des épis. Comme pour les mesures précédentes, cette différence est plus faible que l'écart-type observé.

### 3-5-2-3- Longueur de l'épi du brin maître

Les résultats sur la longueur des épis sont consignés dans la figure 10 et le tableau 9 et ont montré que chez les sanio, la longueur moyenne des épis est de 56 ± 9 cm et chez les sounas elle est de 64 ± 13 cm.



**Figure 10.** Boxplot longueur des épis des accessions de mil souna et sanio

Les résultats des deux modèles linéaires testés attestent que le  $R^2$  ajusté est extrêmement faible pour le modèle 1. Le 2<sup>ème</sup> modèle semble le plus adéquat, néanmoins la normalité des résidus n'est pas atteinte (Annexe 6 et tableau 8). Les résultats de ce modèle 2 indiquent un effet de variété ( $p = 2.2e^{-16}$ ) et un effet d'accession au sein des blocs ( $p = 2.2e^{-16}$ ).

Les analyses par bloc de l'effet des variétés ont montré des effets significatifs dans chacun des blocs, ce qui aboutit à une statistique combinée significative (Fischer combined chisq = 210.558 avec df = 6 et  $p = 1.071058e^{-42}$ ).

**Tableau 8.** Modèles linéaires testés sur la longueur de l'épi avec la p-value du Shapiro test des résidus du modèle, valeurs de AIC et de BIC

	Variable	$R^2$ ajusté	Normalité des résidus	AIC	BIC
<b>Modèle 1:~Variété*Bloc</b>	sqrt(LongEpi)	0.08269	2.2e-16	9162.793	9206.663
<b>Modèle 2:~Variété + Bloc/Code</b>	sqrt(LongEpi)	0.3397	2.2e-16	8257.208	10908.230

En somme, il existe une différence de l'ordre de 8 cm entre les variétés de mil sanio et souna pour ce qui est de la longueur des épis. Néanmoins, cette différence est inférieure à l'écart-type observé pour la variété souna, ce qui indique que ce n'est pas une bonne mesure de discrimination.

D'après le tableau 9, nous constatons que les variables épiaison, l'aristation et longueur des brins permettent de différencier les variétés de mil souna et sanio. Cependant, les variables tels que diamètre des brins, diamètre des épis et fertilité ne présentent pas une grande différence entre les deux groupes de variétés.

**Tableau 9.** Récapitulatif des différences entre mil souna et sanio suivants les variables

Variabes	Souna	Sanio	Différence Sanio vs Souna
<b>Épiaison (jours)</b>	47 ± 4	77 ± 6	+ 30 jours ***
<b>Long. brin (cm)</b>	244 ± 27	295 ± 38	+ 50 cm ***
<b>Diam. brin (cm)</b>	1.60 ± 0.25	1.87 ± 0.8	+ 0.30 cm
<b>Long. Epi (cm)</b>	64 ± 14	56 ± 9	- 8 cm
<b>Diam. Epi (cm)</b>	2.38 ± 0.41	2.55 ± 0.35	+0.20 cm
<b>Fertilité (ratio)</b>	0.54 ± 0.16	0.54 ± 0.14	≈0
<b>Aristation (%)</b>	2%	99.84%	***

\*\*\*= significatif

## VI. DISCUSSIONS

La caractérisation de traits agromorphologiques permet d'identifier des groupes variétaux mais également de comprendre les liens, corrélations entre les traits et par conséquent constituer une information importante pour les schémas de sélection. Un certain nombre d'étude se sont intéressées à la caractérisation des mils en Afrique de l'Ouest (Bono *et al.*, 1973, Ouendeba *et al.*, 1995, Haussmann *et al.*, 2007, Haussmann *et al.*, 2012, Pucher *et al.*, 2015) et au Sénégal (Sy *et al.*, 2015, Diallo 2012).

Les résultats ont montré des corrélations positives (0.61) entre l'épiaison et la longueur des brins. Comparé aux travaux de plusieurs auteurs, une corrélation comparable (0,62) a été notée par Pucher *et al.* (2015) contrairement aux résultats sur les variétés de mil en Afrique de l'Ouest de Ouendeba *et al.* (1995) qui présente une corrélation de -0,11. La similarité de nos résultats à ceux de Pucher *et al.* (2015) pourrait s'expliquer par le fait que les deux études ont portées sur des variétés à cycle long et court contrairement à Ouendeba *et al.* (1995) dont l'étude ne s'intéresse qu'à des variétés à cycle court. Si nous regardons au sein du groupe des mils souna plus précisément, nous notons une corrélation de 0,05.

En ce qui concerne les résultats sur les relations entre diamètres et longueurs du brin et de l'épi, nos résultats ont révélé des corrélations positives. Ces corrélations confirment les résultats de Pucher *et al.* (2015) à l'exception de celle entre la longueur du brin et le diamètre de l'épi qui est de -0,14 dans leurs travaux, alors que notre étude montre une corrélation de 0,23 entre ces deux variables.

Dans les deux études des corrélations positives sont mis en évidence entre la taille (longueur et diamètre) de la plante et de l'épi notamment pour Ouendeba *et al.* (1995) avec des corrélations  $> 0.3$ . Il ressort de ces résultats que l'épiaison est souvent corrélée positivement aux mesures de taille, elle semble impacter négativement le rendement. Pucher *et al.* (2015) expliquent ceci par une forte variabilité au niveau des sites des essais et des conditions non-contrôlés. Dans leurs expérimentations, les sites du Nord (les pays du sahel) où les risques de sécheresse sont importants les variétés à cycles longs ont des rendements plus faibles mais dans des sites où l'apport en eau n'est pas limitant, ces dernières produisent mieux. Si nous n'avions pas expérimentés des problèmes d'attaque de cécidomyies nous aurions pu valider cette hypothèse.

En ce qui concerne la caractérisation variétale, l'ensemble des études montre une forte variabilité chez le mil et au sein des variétés. Ceci s'explique par le mode de reproduction allogame qui se traduit par une forte variabilité génétique (Dussert *et al.*, 2015, Diack *et al.*, 2017) mais aussi par des pratiques d'association culturale favorisant les flux de gènes entre

variétés à cycle court et à cycle long (Niangado 2001, Allinne *et al.*, 2008). Au Sénégal, cette caractérisation s'est principalement faite sur des variétés à cycle court (Ouendeba *et al.*, 1995, Sy *et al.*, 2015) sauf pour Marchais *et al.* (1982).

Les résultats obtenus ont montré que les accessions de type souna débutent leur épiaison entre le 43<sup>ème</sup> et 51<sup>ème</sup> jour après semis alors que celles sanio commencent à épier à partir de leur 70<sup>ème</sup> voire 80<sup>ème</sup> jour après semis. Cette différenciation marquée dans la durée du cycle mesuré en terme de nombre moyen de jour à 50% de floraison après semis est observée chez la plus part des études (Hausmann *et al.*, 2007, Pucher *et al.*, 2015, Sy *et al.*, 2015, Ouendeba *et al.*, 1995). Selon Diallo (2012), bien que les variétés à cycle court soient moins photosensibles que celles à cycle long, il constate dans les deux groupes une variabilité de la durée en fonction de la date de semis.

En ce qui concerne la longueur des brins, notre étude révèle que les mils de type sanio sont plus longs que ceux de type souna. Ce résultat est similaire à celui d'Akanvou *et al.* en 2012 dans son étude sur l'évaluation de la diversité agromorphologique des accessions de mil collectées en Côté d'Ivoire, indiquant que le groupe des mils tardifs renferme des individus de grandes tailles (351 à 360 cm de long). De même les résultats de Dancette (1983 a et b) et Siene Laopse *et al.* (2010) qui indiquent que le mil sanio a une taille plus élevée souvent comprise entre 3-3,5 m, contrairement au mil souna (2-2,5 m). Ouendeba *et al.* (1995) observent une longueur de brin de 216 cm pour le souna 3 et variant de 163 à 269 cm pour les variétés de cycle court en Afrique de l'Ouest. Au Sénégal, le mil souna de Niakhar paraît donc être dans les plus grandes chez les variétés à cycle court. Les mêmes remarques peuvent être faites pour la longueur de l'épi qui est relativement long de 64 cm contre 49 cm pour la variété souna 3 et entre 26 et 62 cm pour les autres variétés (Ouendeba *et al.*, 1995). Le diamètre de l'épi est plus faible que toutes les autres mesures (Ouendeba *et al.*, 1995).

S'agissant de la longueur des épis, nos résultats ont montré que les mils souna présentent des épis plus longs que ceux des sanio. Ces résultats sont similaires à ceux de Clément (1985) et de Zongo *et al.* (1988) qui ont mis en évidence deux groupes de mil au Burkina Faso à savoir: un groupe de mil précoce avec de grands épis et un groupe tardif ayant des épis courts. Cette différence de taille d'épi a également été observée au Sénégal par Marchais *et al.* (1982) avec des épis de plus de 49 cm mais moins large 7.1 cm de circonférence en moyenne pour le mil souna et 42 cm et 7.2 cm pour le mil sanio collectés dans les années 1970. Ceci rejoint nos observations, nous pouvons également constater que dans les deux groupes, les variétés d'aujourd'hui ont des épis plus long et plus gros. Ces observations rejoignent les résultats

trouvés par Cissé *et al.* (2017) qui trouvent des différences significatives de taille de l'épi chez les variétés précoces du Sénégal des années 1970 par rapport à celles d'aujourd'hui.

Pour les mesures de diamètre des épis et de brins, la différence entre les accessions de mil souna et sanio est relativement faible et variable, ces mesures apparaissent donc comme des mesures moins fiables pour la discrimination variétale.

L'analyse de la fertilité chez les deux groupes de mils montre qu'il n'existe pas de différence entre le mil sanio et le mil souna. Des auteurs comme Sy (2015) soutient que, plus les variétés sont tardives plus les plantes sont vigoureuses et fertiles en talles. Cependant, Bono (1973) a montré qu'en cas de stress hydrique les variétés hâtives de mil présentent des talles productives moins importantes. Alors que dans notre étude toutes les variétés ont été soumises à de bonnes conditions hydriques (irrigation d'appoint chaque semaine).

En dehors de ces paramètres quantitatifs, on note la présence d'un caractère qualitatif qu'est l'aristation et qui permet de distinguer les mils sanio et les mils souna. Les sanio sont aristés alors que les épis des sounas en sont dépourvues à l'exception de quelques individus (51 sur les 2683 individus souna, soit 2%) qui en possède mais à un niveau de longueur même moins poussé que celle des sanio.

Mais il existe, en plus de la différence qui permet de distinguer les souna et les sanio une variabilité interne des caractères, propre à chacun de ces deux groupes surtout chez les souna.

L'effet bloc noté presque sur l'ensemble des paramètres étudiés peut être lié aux conditions du milieu (gradient de fertilité du terrain), ce qui fait que les accessions peuvent se comporter différemment en fonction des types de sols ou des zones agroécologiques.

## **CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES :**

Notre étude portant sur la caractérisation des variétés à cycle court et à cycle long du mil pour l'exploitation d'un potentiel adaptatif face aux changements climatique a permis de faire une première analyse de la différence entre les mils souna et sanio du Sénégal.

Dès lors, nous pouvons dire que le mil de type souna est caractérisé par une épiaison précoce et des épis longs tandis que le mil sanio est de grande taille avec des épis courts. Les résultats montrent aussi que dans les deux groupes, les variétés d'aujourd'hui ont des épis plus long et plus gros comparées à celles des années 70.

Sur l'ensemble des caractères de discrimination utilisés dans cette étude, nous pouvons dire que c'est la date d'épiaison et l'aristation qui représentent les caractères majeurs qui permettent de différencier les deux groupes. A cela s'ajoute les différences de longueur des brins et des épis qui sont aussi des caractères importants.

Nos résultats ont permis également de mettre en évidence l'existence de quelques accessions de mil souna qui sont aristés, même si cette aristation est moins développé en longueur que celui des sanio. Ceci pourrait s'expliquer en partie par des flux de gènes entre les variétés pendant l'association culturelle.

Ainsi, il convient de mener cette étude sur plusieurs saisons afin d'obtenir des données pouvant fournir des informations sur le poids des grains, et des épis qui pourraient contribuer à une meilleure connaissance des deux groupes de mils. De plus, les programmes de sélection de mils pourront alors essayer d'améliorer des deux groupes de variétés dans une perspective de maximisation de l'association...

De même, un regard doit être fait sur d'autres paramètres plus fonctionnels tels que la taille des grains, les variables de rendements et les racines.

Egalement identifier les gènes associés à ces caractères phénotypiques serait important dans une perspective d'amélioration génétique, afin de tester les réponses aux différentes dates et schéma de semis entre les deux groupes de mil.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Akaike, H. (1974).** A new look at the statistical model identification. *IEEE transactions on automatic control*. AC 19: 716-723.
- Alhassane, A. (2009).** Effets du climat et des pratiques culturales sur la croissance et le développement du mil (*Pennisetum glaucum* [L.] R.Br.) au sahel : contribution à l'amélioration du modèle SARRA-H de prévision des rendements. UFR Biosciences-Laboratoire de physiologie végétale-Université de Cocody-Abidjan. 236 pp.
- Allinne, C., Mariac, C., Vigouroux, Y., et al. (2008).** Role of seed flow on the pattern and dynamics of pearl millet (*Pennisetum glaucum* [L.] R. Br.) genetic diversity assessed by AFLP markers: a study in south-western Niger. *Genetica*, 133, 167–178.
- Amadou, M. (1994).** Analyse et modélisation de l'évaporation-transpiration d'une culture de mil en région aride sahéenne. *Thèse de Doctorat. En science de l'Université Paris XI ORSAI. N° d'ordre : 3490 ; 106p.*
- Amusan, I. O., Patrick, J. R., Menkir, A., Thomas, H., Ejeta, G. (2008).** Resistance to *Striga hermonthicain* a maize inbred line derived from *Zea diploperennis*. *New Phytologist*, 178: 157–166.
- ANSD, (2013).** Recensement Général de la Population et de l'Habitat, de l'Agriculture et de l'Elevage (RGPHAE) 2013.
- Beebe, T. J. C. (1995)** Amphibian breeding and climate. *Nature* 374, 219–220. Doi: 10.1038/374219a0.
- Belliard, J., & Pernes, J. (1985).** *Pennisetum typhoides*. In: Halevy AH (eds) *CRC Handbook of Flowering*, vol 4. CRC Press, Boca Raton, Florida, pp 22–37.
- Ben Mohamed, A., Van Duivenbooden, N., Abdoussallam, S. (2002).** Impact of climate change on agricultural production in the Sahel-part 1. Methodological approach and case study for millet in Niger. *Climatic Change*, 54: 327-348.
- Bates, D., Maechler, M., Bolker, B., Walker, S. (2016).** R package version 1 (7) lme4: Linear mixed-effects models using Eigen and S4
- Bezançon, G., Pham, J.L., Deu, M., Vigouroux, Y., Sagnard, F., et al. (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. *Genet Resour Crop Evol* 56: 223–236.
- Bono, M. (1973) -** Contribution à la morphosystématique des *Pennisetum* annuels cultivés pour leur grain en Afrique Occidentale francophone. *Agronomie tropicale*, 28 (3): 229-356.

- Both, C. et al. (2004)** Large-scale geographical variation confirms that climate change causes birds to lay earlier. *Proc. R. Soc. B* 271, 1657–1662. (doi:10.1098/rspb.2004. 2770).
- Boubacar, B. I. (1985)**. Suivi de la croissance et du développement d'une gamme de variétés de mil (*Pennisetum typhoides*) dans les conditions pluviométriques de l'Ouest Nigérien. Rapport de stage, *ICRISAT / Niamey juin 1985*. 46p.
- Bouzou, I. M. (2009)**. Evaluation de l'effet du composte enrichi avec des urines hygiénisées sur la culture du mil.
- Burkle, L. A., Marlin J. C., Knight T. M. (2013)**. Interactions plantes-pollinisateur plus de 120 ans: la perte d'espèces, co-occurrence et leur fonction. - *Sciences* **339** : 1611 - 1615 .
- Cerighelli, R. (1955)**. Cultures tropicales (tome I): plantes vivrières. *Librairie J-B. Baillière & Fils*, 19, Haute feuille: 635 pp.
- Carroll, A. B., Stephen, G., Pallardy, G., et Candace, G. (2001)**. Le stress hydrique, l'état hydrique de la plante et l'expression de trait floral dans épilobe, *Epilobium angustifolium* (Onagraceae). - *Am. J. Bot.* **88** : 436 - 446 .
- Chmielewski, F.M., & Rötzer. T. (2002)**. Annual and spatial variability of the beginning of growing season in Europe in relation to air temperature changes. *Clim. Res.*, 19 (2002), pp. 257–264.
- Cissé, A. (2017)**. Caractérisation agromorphologique et temporel des variétés traditionnelles de mil du Sénégal. Mémoire de Master 2, Université Gaston Berger de Saint-Louis, 55p.
- Clerget, B., Haussmann, B.I.G., Boureima, S. S. and Weltzien, E. (2007)**. Surprising flowering response to photoperiod: Preliminary characterization of West and Central African pearl millet germplasms. *SAT eJournal* 5 (1).
- Clerget, B. (1999)**. Etude comparée de la croissance et du développement de deux variétés de sorgho de race Caudatum et Guinea. En conditions optimales et sous l'effet d'un déficit hydrique au cours du tallage. Mémoire de DEA. Institut National Agronomique Paris-Grignon, Paris France, 32p.
- Clotault, J., Thuillet, A. C., Buiron, M. et al. (2012)** Evolutionary history of pearl millet (*Pennisetum glaucum* [L.] R. Br.) and selection on flowering genes since its domestication. *Molecular Biology and Evolution*, 29, 1199–1212.
- CNRA, (2016)**. Relevés hebdomadaire de la temperature et de la pluviométrie, Station Agrométéorologique du CNRA de Bambey.
- Crimmins, S.M., Edwards, J.W., , W., Keyser, P.D., and Crum, J. M. (2010)**. Browsing Patterns of White-Tailed Deer Following Increased Timber Harvest and a Decline in

Population Density International Journal of Forestry Research Volume 2010, Article ID 592034, 7 pages <http://dx.doi.org/10.1155/2010/592034>

**Dancette, C. (1983).** Besoins en eau du mil au Sénégal. Adaptation en zone semi-aride tropicale. *Agronomie Tropicale* 38 (4): 267-280.

**Dapsa, (2013).** Données statistiques campagne agricoles de la culture du mil et de l'arachide.

**Denis, J. (1984).** Manuel des Principales Cultures Sahélienne, Tome 1. Publications Agrhymet, 173, Niamey.

**Dewey, M. (2017).** Metap: meta-analysis of significance values. R package version 0.8.

Diack, O., Kane, N. A., Salazar, C. B., Gueye, M. C., Diop, B. M., Fofana, A., et al. (2017). New Genetic Insights into Pearl Millet Diversity As Revealed by Characterization of Early- and Late-Flowering Landraces from Senegal. *Front. Plant Science*. 17 May 2017. Pages 1-8. Doi: 10.3389/fpls.2017.00818

**Diallo, S. (2012).** Caractérisation des cycles de développement de dix (10) variétés de mil de diverses origines sur trois sites situés le long d'un gradient latitudinal au Sénégal. Mémoire d'ingénieur, Ecole Nationale Supérieure d'Agriculture de Thiès. 43 p.

**Diop, M., Reyniers, F.N., et Sarr, B. (2005).** Apport du photopériodisme à l'adaptation du mil à la sécheresse en milieu Soudano-sahélien. 16(1): 35-40.

**Diop, M. (1999).** Caractérisation du facteur hydrique en agriculture pluviale au Sénégal : le cas de l'arachide et du mil. *Thèse Doc. de géographie, spécialité : Climatologie. Université de Bourgogne, UNRS UPRESA « climatologie de l'espace tropical*. 185 p.

**Doi, H., Takahashi, M., et Katano, I. (2010).** Genetic diversity increases regional variation in phenological dates in response to climate change. Volume 16, Issue 1 January 2010. Pages 373-379. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2009.01993.x

**Dray, S., & Dufour, A. B. (2007).** The ade4 package: implementing the duality diagram for ecologists. *Journal of Statistical Software*, 22, 1–20.

**Dunn, P. O., & Winkler, D. W. (1999).** Climate change has affected the breeding date of tree swallows throughout North America. *Proc. R. Soc. Lond. B* **266**, 2487-2490.

**Dussert, Y., Remigereau, M. S., Fontaine, M. C., et al. (2013)** Polymorphism pattern at a miniature inverted-repeat transposable element locus downstream of the domestication gene *Teosinte-branched1* in wild and domesticated pearl millet. *Molecular Ecology*, 22, 327–340.

**Eldin, M. (1993).** Analyse de l'effet des déficits hydriques sur la récolte du mil au Niger conséquences agronomiques. Pages 149-160 in Serge Hamon (éds). *Le mil en Afrique diversité génétique et agro-physiologie: potentialités et contraintes pour l'amélioration génétique et l'agriculture* ORSTOM Editions, Paris, France.

- FAO. (2015).** Food and Agriculture Organization of the United Nations. FAOSTAT: <http://faostat.fao.org/> (accès en ligne: 20 Mars 2017).
- Fitter, A. H., & Fitter, R.S. R. (2002).** Rapid Changes in Flowering Time in British Plants. *Science* 296:1689–1691. Doi: 10.1126/science.1071617.
- Fitter, A. H., Fitter, R.S. R., Harris, I.T. B., et Williamson, M. H. (1995).** Les relations entre la première date de floraison et la température dans la flore d'une localité dans le centre de l'Angleterre. *Ecologie fonctionnelle* 9: 55 – 60.
- Forrest, J.R. K. (2015)** Plant-pollinator interactions and phenological change: what can we learn about climate impacts from experiments and observations? *Oikos* 124:4–13. Doi: 10.1111/oik.01386.
- Forster, M. L., & Shapiro, A. M. (2003).** Climatic trends and advancing spring flight of butterflies in lowland California. *Global Change Biology* (2003) 9, 1130-1135.
- GIEC. (2007).** Climate change 2007: impacts, adaptation and vulnerability. Summary for policy makers. Contribution of working group II to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. [www.ipcc.ch](http://www.ipcc.ch).
- Hausmann, B.I. G., Boureima, S. S., Kassari, I. A., Moumounii, K. H., and Boubacar, A. (2007).** Mechanisms of adaptation to climate variability in West African pearl millet landraces –a preliminary assessment. *E -Journal of Semi-Arid Tropical (SAT) Research*. Vol. 3(1).
- Heide, OM 2003.** Retards de haute température d'automne printemps débourrement dans les arbres boréales, contrebalançant l'effet du réchauffement climatique. *Arbre Physiol* 23: 931-963.
- Höhn, A., Kahlheber, S., Neumann, K., & Schweizer, A. (2007).** Settling the rain forest—The environment of farming communities in southern Cameroon during the first millennium BC. In J. Runge (Ed.), *Dynamics of forest ecosystems in Central Africa during the Holocene: Past–present–future, Palaeoecology of Africa*, 28 (pp. 29–41).
- Jombart, T., Kamvar, Z. N., Lustrik, R., Collins, C., Beugin, M., Knaus, B., Solymos, P., Schliep, K., Ahmed, I., Cori, A., et Calboli, F. (2016).** Adegnet: Exploratory Analysis of Genetic and Genomic Data. Version 2.0.1: <http://adegenet.r-forge.r-project.org>.
- Kahlheber, S., Bostoen, K., & Neumann, K. (2009).** Early plant cultivation in the Central African rainforest: First millennium BC pearl millet from South Cameroon. *Journal of African Archaeology*, 7, 253–272.

- Kazan, K., & Lyons, R. (2015).** The link between flowering time and stress tolerance J Exp Bot. 2016 Jan; 67(1):47-60. Doi: 10.1093/jxb/erv441. E pub 2015 Oct 1. Review. PMID: 26428061
- Kingston, C. M., Klinac, D. J., van-Epenhuijse, C. W. (1990)** Floral bud disorders of nashi (*Pyrus serotina*) grown in New Zealand. New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science 18:157–159. Doi: 10.1080/01140671.1990.10428088.
- 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.
- Kruskal, W. H., & Wallis, W. A. (1952).** "Use of ranks in one-criterion variance analysis". Journal of the American statistical Association. 47 (260): 583–621. Doi: 10.1080/01621459.1952.10483441
- Kosmowski, F., Gidigaye, M., Muller, B., et Lalou, R. (2013).** Les sociétés rurales face aux changements climatiques et environnementaux en Afrique de l'ouest : Innover en milieu rural ouest-africain (Quels changements dans les pratiques agricoles des exploitants ?) IRD éditions, 2015. p. 359-375. <http://www.openedition.org/6540>.
- Körner, C., & Basler, D. (2010).** Phenology under global warming. [www.sciencemag.org](http://www.sciencemag.org). 327
- Le Barbé, L., Lebel, T., et Tapsoba, D. (2002).** Rainfall Variability in West Africa during the Years 1950–90. *Journal of Climate* 15 (2): 187-202.
- Lakis, G., Ousmane, A. M., Sanoussi, D., et al. (2011).** Evolutionary dynamics of cycle length in pearl millet: the role of farmer's practices and gene flow. *Genetica*, 139, 1367–1380.
- Loumarem, M. (2004).** Etude de la variabilité des populations de mil (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.) cultivées dans les régions arides tunisiennes et selection de variétés plus performantes. *Thèse Doctorat Science Biologie Appliquées Section Agronomie*.
- Luterbacher, J., Liniger, M. A., Menzel, A., Estrella, N., Della-Marta, P. M., Pfister, T., Rutishauser, T., and Xoplaki, E. (2007).** The exceptional European warmth of autumn 2006 and winter 2007: Historical context, the underlying dynamics and its phenological impacts, *Geophys. Res. Lett.*, 34, L12704, Doi: 10.1029/2007GL029951.
- Maiti, R. K., & Bidinger, F. R. (1981).** Growth and development of the pearl millet plant Research Bulletin No 6. Patancheru, A P., India: International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics.
- Manning, K., Pelling, R., Higham, T., Schwenniger, J.L., and 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.

- Marchais L. (1982)** - La diversité phénotypique des mils pennicellaires cultivés au Sénégal et au Mali. *L'Agronomie tropicale* 37 : 68-80.
- McKinney, A. M., CARADONNA, P. J., Inouye, D. W., Barr, B., Bertelsen, C.D., Waser, N. M. (2012)**. Changements asynchrones dans la phénologie de la migration des colibris larges et leurs ressources à queue de nectar en début de saison. - *Ecologie* 93 : 1987 – 1993
- Mendiburu, F. (2016)** Agricolae: statistical procedures for agricultural research. R package version 1.2.4. 2016.
- Menzel, A. (2003)**. Anomalies phénologiques des Plantes en Allemagne et leur relation avec la température de l'air et NAO Changement climatique, 57 (2003), pp. 243-263.
- Menzel, A., Estrella, N., Fabian, P. (2001)**. La variabilité spatiale et temporelle des saisons phénologiques en Allemagne de 1951-1996 *Global Change Biology*, 7 (2001), pp. 657-666.
- Menzel, A. (2000)**. Tendances des phases phénologiques en Europe entre 1951 et 1996. *International of Journal Biométéorologie*, 44 (2), 76-81. Doi : 10.1007/s004840050004.
- Menzel, A., & Fabian, P. (1999)**. Saison de croissance prolongée en Europe *Nature*, 397 (1999), p. 659.
- Moumouni, K. H. (2014)**. Construction d'une carte génétique pour le mil, *Pennisetum glaucum* (L.) R. Br., par une approche de génotypage par séquençage (GBS). *Mémoire de Maîtrise en biologie végétale*. Québec, Canada 80 Pages
- Muller, B., Lalou, R., Kouakou, P., Soumaré, M. A., Bourgoïn, J., Dorégoy, S., et Sine, B. (2015)**. Les sociétés rurales face aux changements climatiques et environnementaux en Afrique de l'ouest : Le retour du mil sanio dans le Sine. IRD Éditions, 2015. p. 377-401. <http://www.openedition.org/6540>.
- Murty, D. S., Tabo, R., et Ajayi, 1995**. Production et gestion des semences d'hybride du sorgho. ICRISAT, Inde, 41 :68 p.
- Niangado, O. (2001)**. The state of millet diversity and its use in West Africa. In: Spillane C, Hodgkin T, Cooper HD (eds) *Broadening the genetic base of crop production*. CABI Publishing in Association with FAO and IPGRI, Rome, pp 147–157.
- Ouendeba, B., Eieta, G., Hannaw, W., Kumar, K. A. (1995)**. Diversity among African pearl millet landrace populations. *Crop Science*, 35: 919-924.
- 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, 489–497.
- Parmesan, C. (2006)**. Ecological and evolutionary responses to recent climate change. *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.*, 37, 637-669.

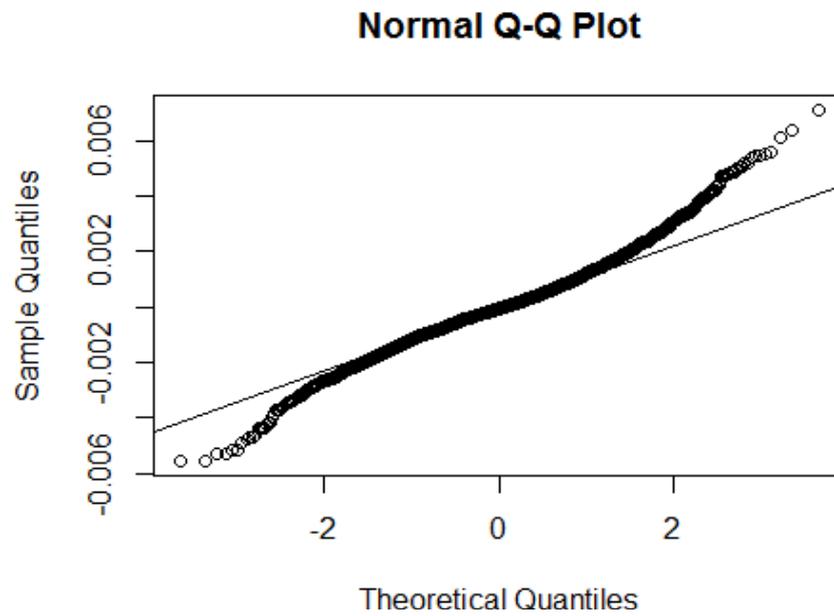
- Parmesan, C., & Yohe, G. (2003).** Une empreinte digitale globalement cohérente des impacts des changements climatiques à travers les systèmes naturels. *Nature*, 421 (6918), 37 - 42. Doi : 10.1038 / nature01286
- Piao, S., Tan, J., Chen, A., Fu, Y. H., Ciais, P., Liu, Q., & Li, Y. (2015).** Leaf onset in the northern hemisphere triggered by daytime temperature. *Nature communications*, 6.
- R Development Core Team.** R: a language and environment for statistical computing. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing, 2016. <http://www.Rproject.org>.
- ROCAFREMI, (2002).** Sélection et mise à la disposition des paysans de variétés et semences appropriées ; résultats du projet P1 1991-1996 .42 p.
- Schwarz, G (1978).** Estimating the dimension of a model. *The Annals of Statistics* 6: 461-464.
- Sehgal, D., Rajaram, V., Armstead, I. P., Vadez, V., Yadav, Y. P., Hash, C.T., et Yadav, R. S. (2012).** Integration of gene-based markers in a pearl millet genetic map for identification of candidate genes underlying drought tolerance quantitative trait loci. *BMC Plant Biol.* 12:9. Doi: 10.1186/1471-2229-12-9.
- Shabani, F., Kumar, L., et Taylor, S. (2014).** Les impacts du changement climatique sur la répartition future des palmiers dattiers: un exercice de modélisation utilisant CLIMEX. *PLoS ONE* 7, e48021. Doi: 10.1371 / journal.pone.0048021.
- Shabani, F., & Kotey, B. (2016).** Distribution future du coton et de blé en Australie en raison des changements climatiques potentiels. *Journal of Agricultural Science, Cambridge* 154, 175-185.
- Shapiro, S., & , M. B. (1965).** An analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika*, vol. 52, n° 3-4, p. 591–611. (DOI 10.1093/biomet/52.3-4.591, JSTOR 2333709.
- Siebert, S., & Ewert, F. (2012).** Spatio-temporal patterns of phenological development in Germany in relation to temperature and day length. Volume 152, 15 January 2012, Pages 44-57 <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168192311002759>.
- Sivakumar, M. V. K., & Salaam, S. A. (1994).** A wet excavation method for root/shoot studies of pearl millet on the sandy soil of the Sahel. *ICRISAT Sahelian Center, Exploitation Agricole*, 30 : 329-336.
- Skarbo, K., & VanderMolen, K. (2015).** Migration de maïs: culture clé étend à des altitudes plus élevées au changement climatique dans les Andes. *Le climat et le développement* 8 (3): 245 – 55

- Skarbo, K. (2012).** Reconfiguration des champs des Andes: la culture, le climat et l'agrobiodiversité (thèse de doctorat). Université de Géorgie, Athènes.
- Sparks, T. H., & Menzel, A. (2002).** Les changements observés dans les saisons : une vue d'ensemble. *Revue Internationale sur la climatologie*, 22, 1715-1725.
- Sparks, T. H., Jeffree, E. P., 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* 44:82–87.
- Straile, D., Kerimoglu, O., Peeters, F. (2015).** Trophic mismatch requires seasonal heterogeneity of warming. *Ecology* 96:2794–2805. Doi: 10.1890/14-0839.1
- Sultan, B., Roudier, P., et Traoré, S. (2015).** Les impacts du changement climatique sur les rendements agricoles en Afrique de l'Ouest *Environmental Research Letter*, 10 : p. 209-22
- Sultan, B., Roudier, P., Quirion, P., Alhassane, A., Muller, B., Dingkuhn, M., et al. (2013).** Assessing climate change impacts on sorghum and millet yields in the Sudanian and Sahelian savannas of West Africa. *Environ. Res. Lett.* 8:014040. doi:10.1088/1748-9326/8/1/014040.
- Sultan, B., Janicot, S., Baron, C., Dingkuhn, M., Muller, B., Traoré, S., Sarr, B. (2008).** Les impacts agronomiques du climat en Afrique de l'Ouest : une illustration des problèmes majeurs *Sécheresse vol. 19, n° 1*: 29-37. Doi: 10.1684/sec.2008.0122
- Sy, O., Fofana, A., Cissé, N., Noba, K., Diouf, D., Ndoye, I., Sané, D., Kane, A., Kane, N. A., Hash, T., Haussman, B., Elwegan, E. (2015).** Étude de la variabilité agromorphologique de la collection nationale de mils locaux du Sénégal. *Journal of Applied Biosciences* 87:8030-8046 published online at [www.m.elewa.org](http://www.m.elewa.org) on 31st March 2015: <http://dx.doi.org/10.4314/jab.v87i1.1>
- Thackeray, S. J., Sparks T. H., et Frederiksen, M. (2010)** asynchronisme niveau trophique des taux de changement phénologique pour les milieux marins, d'eau douce et terrestres . *Global Change Biology*, 16, 3304 - 3313
- Thiaw, S., Hall, A. E., Parker, D. R. (1993).** Varietal intercropping and the yields and stability of cowpea production in semiarid Senegal. *Field Crops Res.* 33, 217-233.
- Traoré, S.B., Reyniers, F. N., Vaksman, M., et al. (2000).** Adaptation à la sécheresse des écotypes locaux de sorghos du Mali. *Sécheresse* 2000; 11: 227-37.
- Thompson, W. K., Nichols, D. G., Jones, D. L. (1974).** Chilling requirements of the apple cultivar Stoke Red. *Animal Production Science* 14:702–704.
- Van Bussel, L.G. J., Ewert, F., et Leffelaar, P.A. (2011).** Effects of data aggregation on simulations of crop phenology *Agric. Ecosystems. Environ.* 142 (2011), pp. 75–84.

- Van Oosterom, E. J., Bidinger, F.R., & Weltzien, E.R. (2003).** A yield architecture framework to explain adaptation of pearl millet to environmental stress. *Field Crops Research* 1, 8 (80): 33-56.
- Visser, M. E., Both, C. (2005)** Shifts in phenology due to global climate change: the need for a yardstick. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 272:2561–2569. Doi: 10.1098/rspb.2005.3356
- Walther, G. R., Post, E., Convey, P., Menzel, A., Parmesan, C., Beebee, T. J. C., Fromentin, J. M., Hoegh-Guldberg, O. & Bairlein, F. (2002)** Ecological responses to recent climate change. *Nature* 416, 389–395. (Doi: 10.1038/416389 a.)
- Wickham, H. (2009)** *ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis*. Springer-Verlag New York
- February Blows Away Global Heat Record.  
<http://www.climatecentral.org/news/february-blows-away-global-heat-record-20134>.  
 Accessed 15 February 2017.
- Wilcoxon, F. 1945.** Des comparaisons individuelles par les méthodes de classement. *Biométrie Bulletin*. 1 (6) : 80-83.
- Winkel T. & F. Do 1992.** Caractères morphologiques et physiologiques de résistance du mil (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.) à la sécheresse. *Agronomie tropicale* 46 (4): 339-351.
- Zongo, J.D., Sédogo, M. C., Sérémé, P., Zangré, G.R. (1988)** - Synthèse des prospections du mil (*Pennisetum glaucum* (L.)R.Br) au Burkina Faso Pp. 121-131. In *Proceedings of the Regional Millet Improvement Workshop* (L .K. Fussell and J.Werder, eds.) ICRISAT-Institute for Agricultural Research, Ahmadu Bello University (IAR), Zaria, Nigeria, 15-19 August 1988. ICRISAT, Patancheru, A.P. 502-324, India.

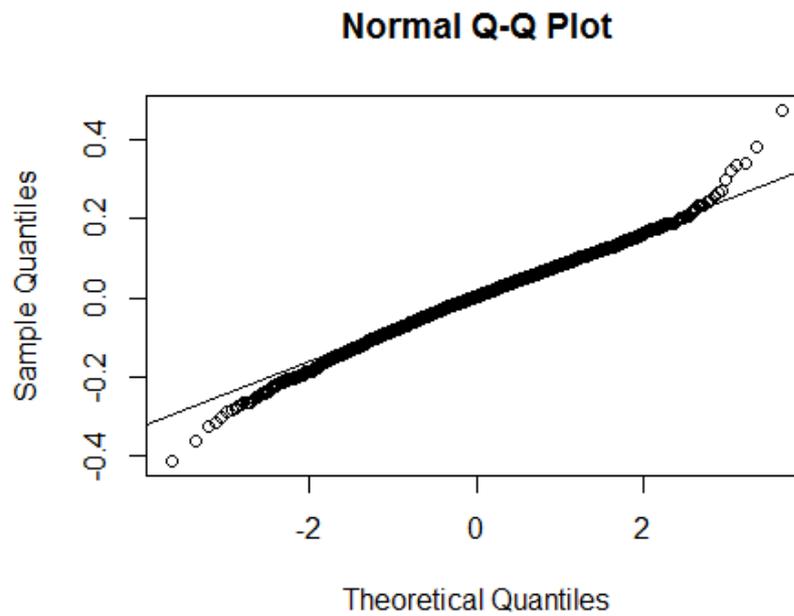
## Annexes

### Annexe 1.



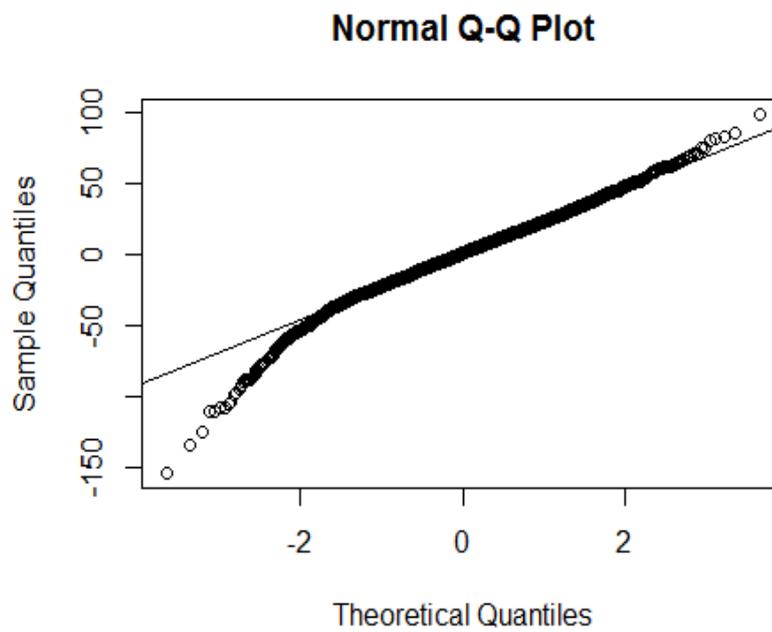
QQPLOT des résidus du modèle linéaire 2 choisi l'épaison

### Annexe 2.



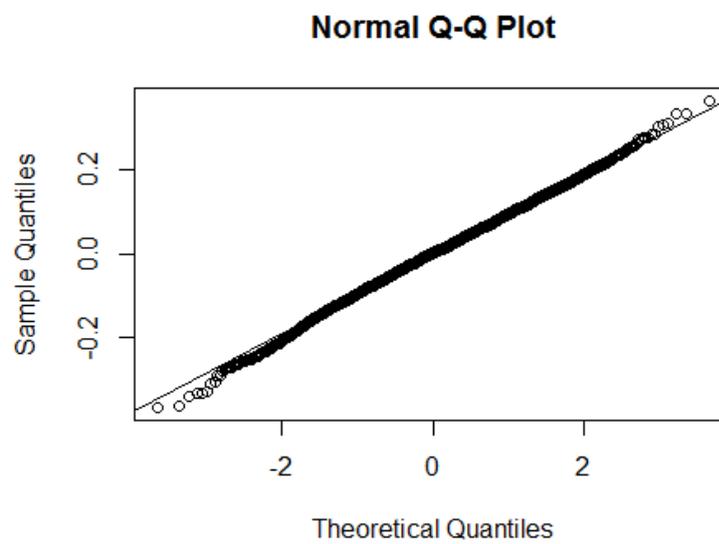
QQPLOT des résidus du modèle linéaire 2 choisi pour le diamètre du brin

**Annexe 3.**



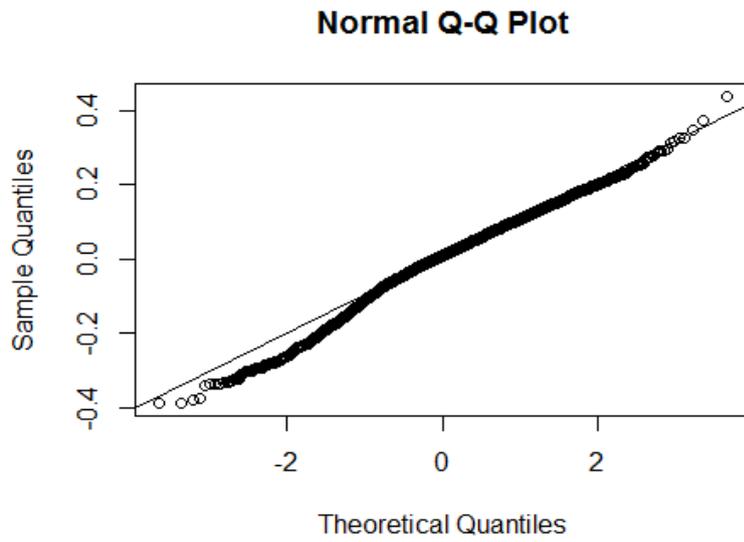
QQPLOT des résidus du modèle linéaire 2 choisi pour la longueur du brin

**Annexe 4.**



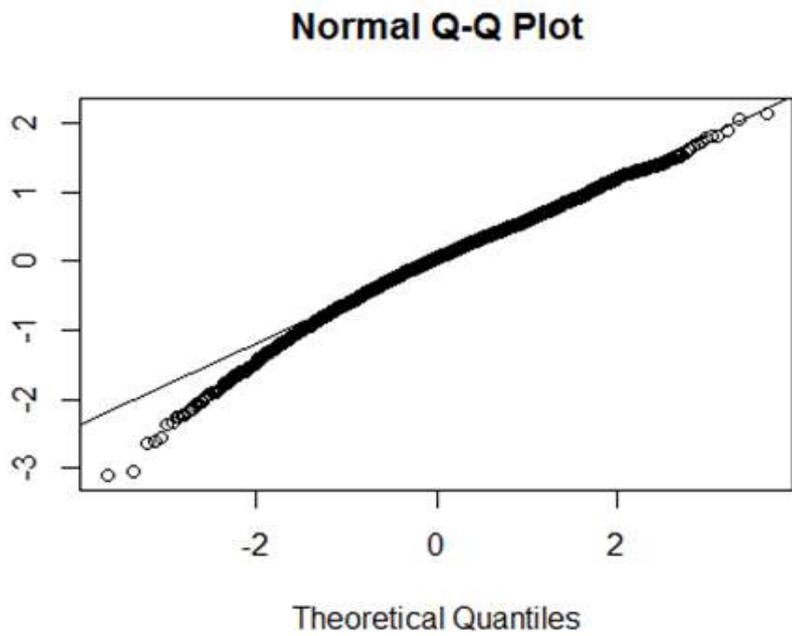
QQPLOT des résidus du modèle linéaire 2 choisi pour la Fertilité

**Annexe 5.**



QQPLOT des résidus du modèle linéaire 2 choisi pour le diamètre de l'épi

**Annexe 6.**



QQPLOT des résidus du modèle linéaire 2 choisi pour la longueur de l'épi