

Université Assane Seck de Ziguinchor



UFR Sciences et Technologies

Département d'Agroforesterie

Mémoire de Master

Spécialité : Aménagement et Gestion Durable des Ecosystèmes Forestiers et Agroforestiers

(AGDEFA)

Sujet :

Effets de la densité de semis et de la fertilisation sur la productivité du mil Sanio (*Pennisetum glaucum* L.) en Haute Casamance (Kolda)

Présenté par

Bissenty LOPY

Sous la direction de **Dr Djibril SARR**,

Co-encadreur : **Dr Aliou FAYE**, chargé de recherches au CNRA/ISRA de Bambey

Soutenu publiquement le 18 Décembre 2018 devant le jury composé de :

Président	M. Abdoul Aziz NIANG	Maître de conférences	UFR-SES/UASZ
Rapporteur	M. Djibril SARR	Maître-Assistant	UFR-ST/UASZ
Examineur	M. Antoine SAMBOU	Maître-Assistant	UFR-ST/UASZ
Examineur	M. Ousmane NDIAYE	Maître-Assistant	UFR-ST/UASZ

Année académique : 2017-2018

DEDICACES

Je dédie ce mémoire à :

Ma **mère** pour tous les innombrables sacrifices consentis pour mon éducation, les prières et encouragements depuis le cycle élémentaire jusqu'à l'université ne m'ont pas laissés indifférent ;

Mon **père** pour m'avoir appris que seul le travail paie dans cette vie, pour le soutien moral et matériel ;

À mes **frères** et **sœurs** en témoignage de mon affection fraternelle, de ma reconnaissance et de ma profonde tendresse ;

Et à mes **neveux** et **nièces**.

Les mots ne suffisent guère pour exprimer l'attachement, l'amour et l'affection que je porte pour vous. Que le Christ vous comble de bonheur, santé, réussite et longévité.

Demeurez bénis.



REMERCIEMENTS

En préambule à ce mémoire je remercie le Seigneur Jésus qui m'a aidé et donné la patience et le courage durant ces cinq années d'études universitaires.

La construction de ce mémoire n'aurait été possible sans l'intervention de certaines personnes. Qu'elles trouvent ici l'expression de mes plus sincères remerciements pour leurs précieux conseils.

- J'exprime mes profonds remerciements à mon maître de stage en occurrence **Dr Aliou Faye** coordonnateur du programme SIIL de m'avoir accueilli et intégré au sein de son équipe. Merci pour son apprentissage, sa collaboration, sa patience et compréhension tout au long de ce stage ce qui a énormément favorisé mon épanouissement personnel ;
- J'adresse de vifs remerciements à mon encadrant **Dr Djibril Sarr** pour l'aide compétente qu'il m'a apporté, pour sa patience et son encouragement. Son œil critique m'a été très précieux pour structurer et améliorer ce mémoire ;
- Merci au **Geospatial Farming System Research Consortium (GFSRC)** de l'Université Californie Davis (USA) pour avoir financé le projet « *Updating Fertilizer Recommendations Across Rainfall Gradients and Soil Fertility Levels for Improving Dual-Purpose Millet Nutrient Use Efficiency in Senegal* » dans lequel a été menée cette étude au Sénégal ;
- Merci à **Dr Mayécor Diouf** chef du Centre de Recherches Zootechniques (CRZ/ISRA) de Kolda qui a bien voulu m'accepter dans son centre, pour l'excellent accueil, les conseils avisés et la bonne humeur partagée durant ce stage ;
- Merci à **Dr Moustapha Gueye** Directeur de la production des semences de l'ISRA pour ses conseils et la confiance qu'il m'accorde quotidiennement ;
- Mes remerciements s'étendent également à tous **mes enseignants de l'UASZ** pour ces cinq années de formation pédagogique exemplaire ;
- Merci à **ma famille** qui m'a accordé la liberté d'action et la patience nécessaires pour réaliser ce travail ;
- Je remercie également **Mme Anne Servaise Dasylla Mendy** de Kolda, ainsi que les membres de sa famille, d'avoir bien voulu m'ouvrir les portes de leur maison ;
- Merci à **Ibrahima Dieng, Lamine Diédhiou** et à **Khaly Niang** pour leurs expériences partagées avec moi ;

- J'adresse mes sincères remerciements à **Mokho Sarr, Binette Faye, David Dione Moustapha** et à **Samba Sané** qui ont compris l'intérêt de ce travail en me consacrant un peu de leurs temps précieux afin de contribuer à la réalisation de ce document ;
- Je n'oublie évidemment pas **mes camarades de formation** et de **l'université** et les remercie chaleureusement pour tous ces agréables moments passés ensemble ;
- Je tiens enfin à remercier **Hélène Ortance Sarr, Christine Gomis** et **Bernard Cyprien Gomis** qui m'ont toujours encouragé au cours de la réalisation de ce mémoire.

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Composition des formules d'engrais pour la densité 1 (0,9 m x 0,9 m)..... 16

Tableau 2 : Composition des formules d'engrais pour la densité 2 (0,9 m x 0,45 m)..... 17

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Phases de croissance et du développement du mil (Maiti et Bidinger, 1981).....	4
Figure 2 : La lèpre du mil.....	6
Figure 3 : La maladie du charbon.....	6
Figure 4 : Symptôme d'ergot.....	6
Figure 5 : Loi de restitution.....	8
Figure 6 : Loi des accroissements moins que proportionnels.....	8
Figure 7 : Loi du minimum.....	8
Figure 8 : Localisation de la station de l'ISRA/CRZ de Kolda.....	13
Figure 9 : Evolution du cumul décadaire de la pluviométrie 2017.....	14
Figure 10 : DSP 25 % P.....	14
Figure 11 : Urée 46 % N.....	14
Figure 12 : KCl 61,3 % K.....	14
Figure 13 : Dispositif expérimental.....	15
Figure 14 : Parcelle élémentaire.....	18
Figure 15 : Mesure de la teneur en chlorophylle à l'aide du Spad.....	18
Figure 16 : Numigral	19
Figure 17 : Balance électronique.....	19
Figure 18 : Evolution de la hauteur des plants en fonction de la densité de semis	20
Figure 19 : Effets des formules d'engrais sur le nombre de talles pour la densité 1.....	21
Figure 20 : Effets des formules d'engrais sur le nombre de talles pour la densité 2.....	21
Figure 21 : Effets des formules d'engrais sur le pourcentage de talles fructifères pour la densité 1	22
Figure 22 : Effets des formules d'engrais sur le pourcentage de talles fructifères pour la densité 2	22
Figure 23 : Effets des formules d'engrais sur la teneur en chlorophylle pour la densité 1.....	23
Figure 24 : Effets des formules d'engrais sur la teneur en chlorophylle pour la densité 2.....	23
Figure 25: Effets de la densité de semis et des formules d'engrais sur la biomasse sèche.....	24
Figure 26 : Effets de la densité de semis et des formules d'engrais sur le rendement en grain...	25
Figure 27 : Effets de la densité de semis et des formules d'engrais sur le poids de mille grains.	26



SIGLES ET ABREVIATIONS

ANSD : Agence National de la Statistique et de la Démographie

ANOVA : **A**nalysis of **v**ariance (Analyse de Variance)

AGDEFA : Aménagement et Gestion Durable des Ecosystèmes Forestiers et Agroforestiers

CIRAD : Centre de Coopération International en Recherche Agronomique pour le Développement

CMA/AOC : Conférence des Ministres de l'Agriculture de l'Afrique de l'Ouest et du Centre

CNRA : Centre National de Recherches Agronomiques

CRZ : Centre de Recherches Zootechniques

DR : Dose Recommandée

DSP : Double Super Phosphate

FAO : Food and Agriculture Organization (Organisation pour L'alimentation et l'agriculture)

FNIE : Fédération Nationale de l'Industrie des Engrais

GFSRC: Geospatial Farming System Research Consortium

IPNI : International Plant Nutrition Institute

ISRA : Institut Sénégalais de Recherches Agricoles

JAS : Jour Après Semis

KCL : Chlorure de Potassium

MO : Matière Organique

NPK : Azote, Phosphore, Potassium

PMG : Poids de Mille Grains

ROCAFREMI : Réseau Ouest et Centre Africain de Recherches sur le Mil

SIIL : Sustainable Intensification Innovation Laboratory

UASZ : Université Assane Seck de Ziguinchor

UFR-SES : Unité de Formation et de Recherche Sciences et Economiques et Sociales

UFR-ST : Unité de Formation et de Recherche Sciences et Technologies

UNIFA : Union des Industries de la Fertilisation

RESUME

Le mil (*Pennisetum glaucum*), céréale la plus cultivée au Sénégal, y joue un rôle crucial dans la sécurité alimentaire. Toutefois les rendements du mil en milieu paysan sont très faibles (< 0,8 t/ha) et largement inférieurs au potentiel des variétés (2,5 à 3 t/ha). Cette faible productivité est en grande partie due à une faible densité de semis et à une formule de fertilisation pas toujours adaptée aux différentes zones agro-écologiques et à tous les types de mil. D'où l'intérêt de réactualiser la formule de fertilisation de manière à augmenter la densité de semis 12 346 poquets ha⁻¹ à 24 691 poquets ha⁻¹. C'est ainsi qu'une expérimentation a été conduite au Centre de Recherches Zootechniques (CRZ) de Kolda. Un dispositif en split plot avec trois répétitions est installé avec le facteur densité de semis pris comme grande parcelle et le facteur fertilisants comme petite parcelle. Deux niveaux de densité de semis, celui appliqué par les producteurs (0,9 m x 0,9 m) et une plus forte densité (0,9 m x 0,45 m) sont appliqués. Le facteur fertilisation comporte 24 niveaux de fertilisants (minéraux, organiques et organo-minéraux). Les résultats ont montré que les formules d'engrais ont influencé significativement le rendement en grain et en biomasse sèche du mil. Pour la densité 0,9 m x 0,45 m, la T20 (324 kg Urée + 270 kg DSP + 55 kg KCL) et la T11 (324 kg Urée + 90 kg DSP + 37 kg KCL) ont donné les meilleurs résultats avec des rendements en grain respectifs de 3022 kg/ha et 2889 kg/ha. Pour la biomasse sèche, les rendements les plus élevés, supérieurs à 4900 kg/ha sont obtenus avec la formule T23 (15 t/ha MO), la T20 (324 kg Urée + 270 kg DSP + 55 kg KCL) et la T22 (12,5 t/ha MO). Quand la densité est faible, les meilleurs rendements en grain sont obtenus avec la formule T23 (7,5 t/ha MO), T20 (199 kg Urée + 121 kg DSP + 44 kg KCL) et la T19 (174 kg Urée + 108 kg DSP + 40 kg KCL) avec des valeurs respectives 2053 kg/ha, 2050 kg/ha et 2014 kg/ha alors que ceux de biomasse sèche sont enregistrés avec la T20 (199 kg Urée + 121 kg DSP + 44 kg KCL) et la T19 (174 kg Urée + 108 kg DSP + 40 kg KCL) avec des rendements en biomasse sèche supérieurs à 5000 kg/ha.

Mots clés : mil, Sanio, densité de semis, fertilisation, rendement.

ABSTRACT

Millet (*Pennisetum glaucum*), the most widely grown cereal in Senegal, plays a crucial role in food security. However, the yields of millet in the farm are very low (<0.8 t/ha) and much lower than the potential of the varieties (2.5 to 3 t / ha). This low productivity is largely due to a low planting density and a fertilization formula not always adapted to the different agro-ecological zones and to all types of millet. Hence the interest of updating the fertilization formula in order to increase the density of seedlings from 12,346 ha⁻¹ to 24,691 ha⁻¹. This is how an experiment was conducted at the Zootechnical Research Center (CRZ) in Kolda. A split plot device with three repetitions is installed with the seeding density factor taken as a large plot and the fertilizer factor as a small plot. Two levels of seeding density, that applied by the growers (0.9 m x 0.9 m) and a higher density (0.9 m x 0.45 m) are applied. The fertilization factor has 24 fertilizer levels (mineral, organic and organo-mineral). The results showed that fertilizer formulas significantly influenced millet grain and dry biomass yield. For density 0.9 mx 0.45 m, T20 (324 kg Urea + 270 kg DSP + 55 kg KCL) and T11 (324 kg Urea + 90 kg DSP + 37 kg KCL) gave the best results with respective grain yields of 3022 kg / ha and 2889 kg/ha. For dry biomass, the highest yields, greater than 4900 kg/ha are obtained with the formula T23 (15 t / ha MO), the T20 (324 kg Urea + 270 kg DSP + 55 kg KCL) and the T22 (12.5 t/ha MO). When the density is low, the best grain yields are obtained with the formula T23 (7.5 t/ha MO), T20 (199 kg Urea + 121 kg DSP + 44 kg KCL) and the T19 (174 kg Urea + 108 kg DSP + 40 kg KCL) with respective values 2053 kg/ha, 2050 kg/ha and 2014 kg/ha while those of dry biomass are recorded with T20 (199 kg Urea + 121 kg DSP + 44 kg KCL) and T19 (174 kg Urea + 108 kg DSP + 40 kg KCL) with dry biomass yields greater than 5000 kg/ha.

Key words: millet, Sanio, seedling density, fertilization, yield.

Table des matières

DEDICACES	i
REMERCIEMENTS.....	ii
LISTE DES TABLEAUX	iv
LISTE DES FIGURES.....	v
SIGLES ET ABREVIATIONS	vi
RESUME.....	vii
ABSTRACT	viii
INTRODUCTION	1
Chapitre 1 : Revue bibliographique	3
1.1. Etat des connaissances sur le mil.....	3
1.1.1. Origine et Taxonomie.....	3
1.1.2. Description de la plante	3
1.1.3. Croissance et développement du mil.....	3
1.1.4. Ecologie du mil.....	5
1.1.5. Contraintes de la culture du mil	5
1.2. Fertilisation et Densité de semis.....	7
1.2.1. Fertilisation	7
1.2.1.1. Fertilisation minérale	9
1.2.1.2. Fertilisation organique	11
1.2.1.3. Fertilisation organo-minérale	11
1.2.2. Densité de semis	12
Chapitre 2 : Matériel et Méthodes.....	13
2.1. Description du site d'étude	13
2.1.1. Présentation du site d'étude.....	13
2.1.2. Données pluviométriques de la campagne.....	13
2.2. Matériel	14
2.2.1. Matériel végétal.....	14
2.2.2. Fertilisants	14
2.3. Méthodes	15
2.3.1. Dispositif expérimental.....	15
2.3.2. Facteurs étudiés	15
2.3.3. Observations et mesures.....	17
2.3.4. Analyses statistiques	19

Chapitre 3 : Résultats et Discussion	20
3.1. Résultats	20
3.1.1. Effets de la densité de semis et de la fertilisation sur les paramètres agro-morphologiques	20
3.1.1.1. Evolution de la hauteur des plants du mil en fonction de la densité de semis 20	
3.1.1.2. Effets de la fertilisation sur le nombre de talles	21
3.1.1.3. Effets de la fertilisation sur le pourcentage de talles fructifères	22
3.1.1.4. Effets de la fertilisation sur la teneur en chlorophylle	23
3.1.2. Effets de la densité de semis et de la fertilisation sur la biomasse sèche et sur le rendement grain	24
3.1.2.1. Effets de la densité de semis et de la fertilisation sur la biomasse sèche ... 24	
3.1.2.2. Effets de la densité de semis et de la fertilisation sur le rendement en grain 25	
3.1.2.3. Effets de la densité de semis et de la fertilisation sur le Poids de Mille Grains (PMG)	26
3.2. Discussion	26
3.2.1. Effets de la densité de semis et de la fertilisation sur les paramètres agro-morphologiques	26
3.2.1.1. Effets de la densité de semis sur l'évolution en hauteur des plants	26
3.2.1.2. Effets de la densité de semis et de la fertilisation sur le nombre de talles 27	
3.2.1.3. Effets de la densité de semis et de la fertilisation sur le pourcentage de talles fructifères	27
3.2.1.4. Effets de la densité de semis et de la fertilisation sur la teneur en chlorophylle	28
3.2.2. Effets de la densité de semis et de la fertilisation sur la biomasse sèche et sur le rendement grain	28
3.2.2.1. Effets de la densité de semis et de la fertilisation sur la biomasse sèche ... 28	
3.2.2.2. Effets de la densité et de la fertilisation sur le rendement en grain du mil 28	
3.2.2.3. Effets de la densité de semis et de la fertilisation sur le Poids de Mille Grains (PMG)	29
CONCLUSION ET PERSPECTIVES	31
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	32

INTRODUCTION

Le mil est la septième céréale cultivée au monde et représente la principale composante dans les systèmes traditionnels de culture des pays au climat aride d'Afrique et d'Asie (Gowda et Rai, 2006). Dans cette partie du monde où la sécurité alimentaire est très précaire, le mil constitue l'aliment de base des populations (Diouf, 2001).

L'Afrique contribue à 40 % de la production mondiale de mil (Moumouni, 2014).

Au Sénégal, la culture du mil est pratiquée sur presque toute l'étendue du territoire avec 75 % des surfaces emblavées en céréale et 60 % de la production céréalière (FAO, 1997). Deux types de mil sont cultivés au Sénégal, le mil Souna, hâtif, cultivé au Nord et au Centre du pays et le mil Sanio, plus tardif et confiné dans la partie Sud. Les rendements de la culture du mil en milieu paysan demeurent très faibles ($< 0,8 \text{ t ha}^{-1}$) et largement en dessous du potentiel des variétés actuellement en circulation ($2,5$ voire 3 t ha^{-1}) (Christianson et al., 1990 ; Diouf, 2001). Cette faible productivité, principalement liée à des déficits pluviométriques récurrents et à une faible fertilité des sols, ne contribue pas à résorber l'écart important entre la demande et la production nationales de mil (Diouf, 2001). D'où la nécessité de mettre au point des stratégies d'augmentation de la productivité pour assurer durablement la sécurité alimentaire des populations. A cet effet, la mise au point de formules de fertilisation adaptées et une amélioration des pratiques de gestion (densité de plantation, précédant cultural) (Decon, 2008) est une priorité.

Il existe certes une formule de fertilisation minérale (150 kg ha^{-1} de NPK 15-15-15 plus 100 kg d'urée à la montaison) ou organique (5 t ha^{-1}) recommandée aux producteurs, mais celle-ci a été développée dans les années 1970, n'a jamais été réactualisée depuis lors. Elle est appliquée indistinctement dans les six zones agro-écologiques du pays sans prise en compte de la variabilité des conditions pédoclimatiques entre ces zones. De plus, cette même formule qui a été testée et validée sur des variétés de mil de type Souna (cultivé dans le bassin arachidier) est appliquée indifféremment sur du mil de type Sanio (cultivé dans la zone Sud) avec un cycle deux fois plus long et un développement végétatif plus important. D'où la nécessité d'une nouvelle formule spécifique à chaque zone pédoclimatique et à chaque type de mil.

En dehors de l'exigence d'une nouvelle formule de fertilisation spécifiquement destinée au mil Sanio, se pose également celle d'élaborer une formule qui contribuera à accroître les rendements par une augmentation de la densité de $0,9 \text{ m} \times 0,9 \text{ m}$ à $0,9 \text{ m} \times 0,45 \text{ m}$. D'où l'objectif général de cette étude qui est de contribuer à l'amélioration durable de la productivité

du mil au Sénégal. De façon plus spécifique, il s'agit d'établir les courbes de réponse du mil Sanio à la fertilisation minérale (N, P et K) et/ou organique en fonction de la densité de semis.

Ce mémoire est structuré autour de trois chapitres. Le premier porte sur la synthèse bibliographique, le deuxième présente le matériel et les méthodes utilisés et le dernier présente les résultats et la discussion.

Chapitre 1 : Revue bibliographique

1.1. Etat des connaissances sur le mil

1.1.1. Origine et Taxonomie

Les données archéologiques, ethnobotaniques et expérimentales sur l'origine du mil sont encore trop éparses (Loumerem, 2004). Mais selon CMA/AOC (2004), il aurait été domestiqué au Sud du Sahara où existent des centres primaires de diversité renfermant des espèces cultivées et des espèces sauvages fertiles. Il s'est ensuite répandu à travers les zones tropicales semi-arides d'Afrique et d'Asie.

Le mil est une monocotylédone appartenant au genre *Pennisetum* (famille des *poaceae*, sous-famille des *Panicoideae*, tribu des *Paniceae*)

1.1.2. Description de la plante

Le mil (*Pennisetum glaucum*) est une plante à métabolisme de type C4 qui lui confère une efficacité hydrique double de celle des plantes en C3 (Dutordoir, 2006). Son appareil végétatif est caractérisé par une importante production de talles, pouvant représenter jusqu'à 70 % de la biomasse totale de la plante (Azam-ali et al., 1984). Il possède un enracinement fasciculé, un port érigé à tiges pleines d'une taille pouvant atteindre 2 à 3 m ainsi qu'un tallage abondant dont seulement une faible partie est productive (Siband, 1981). Ces talles sortent au niveau de la base et peuvent former des tiges secondaires et tertiaires (tallage). Les tiges du mil sont densément velues, solides et pleines. Ses feuilles alternes sont longues assez minces et peuvent être lisses ou poilues (Moumouni, 2014). Elles ont une longueur variant de 20 à 100 cm pour une largeur variant entre 5 et 50 mm. La longueur de l'épi (ou chandelle) varie de 10 à plus de 100 cm de longueur (Ahmadi et al., 2002). L'inflorescence terminale est une panicule contractée ou faux épi. Il est formé d'épillets (Eldin, 1990). Chaque épillet possède jusqu'à 5 fleurs. Certaines de ces fleurs sont fertiles et forment des caryopses (Rocafremi, 2002). Les organes mâles et femelles n'arrivent pas en même temps en maturité. C'est une espèce allogame (70 %) pour laquelle la pollinisation est anémophile et occasionnellement entomophile (Ahmadi et al., 2002). Le Caryopse représente le fruit avec une forme ovoïdale ou elliptique, longue d'environ 4 mm et de couleur variable (blanche, jaune, gris ou bleu) : 1000 graines pèsent de 4 à 8 g (Denis, 1984).

1.1.3. Croissance et développement du mil

La croissance et le développement du mil sont marqués par trois (3) phases : la phase végétative, la phase reproductive et la phase de maturation.

➤ Phase végétative

La phase végétative débute par la germination de la graine et l'apparition des jeunes plantes, et continue jusqu'à l'initiation de la panicule. Elle dure 30 à 50 jours (Loumerem, 2004). La germination marquée par le gonflement de la graine se produit rapidement dans un sol chaud (20°C ou plus) et humide, et prend alors de 2 à 3 jours. Le tégument se brise et une coléoptile mince ainsi que la racine primaire apparaissent (Maiti et Bidinger, 1981). La formation des talles débute entre le dixième et quinzième jour après semis. Elle prend naissance à partir du nœud basal dès la sortie des racines secondaires. La ramification de la panicule débute 1 à 2 jours après le déclenchement floral (Loumerem, 2004).

➤ Phase reproductive

La phase reproductive est marquée par l'épiaison, la floraison et la fructification. Le développement total des feuilles et la sénescence des feuilles à la base de la tige principale (feuilles âgées) sont notés durant cette phase (Loumerem, 2004). La floraison femelle débute tout d'abord, puis celle mâle. Le stade 50 % de floraison est atteint lorsque l'inflorescence couvre la moitié de la hauteur de l'épi (Eldin, 1990). Après la fécondation, le grain se développe. Son remplissage est assuré essentiellement par l'activité photosynthétique des 3-4 dernières feuilles (Jacquinot, 1970).

➤ Phase de maturation

La maturité du grain se fait en trois étapes : la maturité laiteuse, la maturité pâteuse et la maturité complète ou physiologique (Siband, 1981). Six à sept jours après la pollinisation, le grain se développe rapidement et devient visible. Durant ce stade, l'enveloppe de la graine s'engorge d'un liquide qui au début est clair et puis devient laiteux. La fin de cette phase est marquée par la sénescence des feuilles les plus basses et du développement d'une petite couche de tissu foncée dans la région du hile de la graine (Loumerem, 2004).

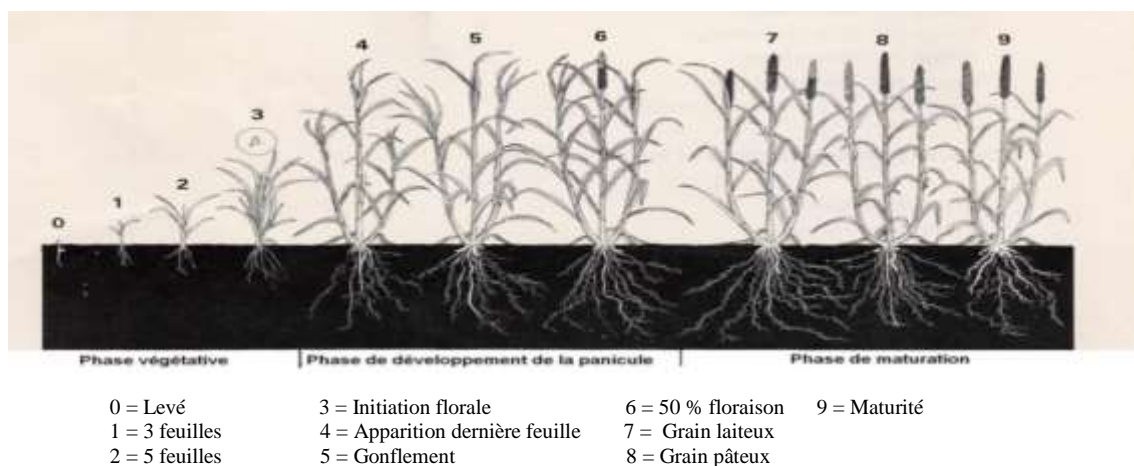


Figure 1: Phases de croissance et du développement du mil (Maiti et Bidinger, 1981)

1.1.4. Ecologie du mil

Le mil est une plante relativement rustique qui s'adapte bien à diverses conditions édapho-climatiques difficiles.

➤ Température

Le mil est exigeant en température et supporte mieux que les autres céréales les températures élevées. En présence suffisamment d'eau dans le sol, la formation des grains et le développement floral peuvent se dérouler à des températures élevées. La plante est sensible à des températures basses (< 10°C) durant les phases de germination et de floraison (Loumerem, 2004). La température moyenne pendant toute la végétation doit être d'environ 28°C (Eldin, 1990).

➤ Lumière

Le mil est une plante photopériodique de type C4 (Badiane, 1999). Il exige une forte intensité lumineuse. C'est une plante de pleine lumière (Moumouni, 2014).

➤ Sol

A part les sols perméables, toutes les terres conviennent à sa culture. Il ne tolère pas les excès d'eau, le sol doit être drainé et aéré. Mais les meilleurs terrains à mil sont sableux ou argilo-sableux, un peu humifères, à pH légèrement acide et contenant de l'azote et de potasse (Illiassou, 2009).

➤ Besoins en eau

C'est la céréale la plus tolérante à la sécheresse. Elle est cultivée dans des régions où la pluviosité annuelle se situe entre 150 et 800 mm (Loumerem, 2004). Selon Dancette (1978), les besoins en eau du mil sont croissants avec le cycle (345 mm pour 75 jours ; 420 mm pour 90 jours ; 600 mm pour 120 jours).

1.1.5. Contraintes de la culture du mil

Les contraintes à la production des systèmes de cultures à base de mil sont multiples : contraintes abiotiques (édaphiques et climatiques), contraintes biotiques (maladies, insectes, adventices) et contraintes socio-économiques (démographie, pauvreté, insécurité alimentaire, ...)

➤ Contraintes abiotiques

Dans les zones semi-arides où la culture du mil est fréquemment pratiquée, les variations pluviométriques sont importantes. Elles sont généralement faibles et irrégulières. Cela perturbe

l'alimentation hydrique des plantes influant négativement la production (Moumouni, 2014). Les fortes températures notées dans les zones sahéliennes durant la saison des pluies peuvent être préjudiciables aux plantes surtout pendant la période de germination et de remplissage (Traoré et *al.*, 2002). Dans ces zones, les sols sont peu fertiles, pauvres en matière organique et sans apport d'engrais chimique (Illiassou, 2009).

➤ Contraintes biotiques

Durant tout son cycle, le mil est victime de déprédateur de tout ordre : maladies, insectes, adventices et oiseaux granivores.

Les maladies : l'un des facteurs de la faible productivité du mil dans le sahel est la perte causée par les maladies : champignons, bactéries, virus, mycoplasme et nématodes. Les plus importants sont le mildiou, le charbon et l'ergot (Mbaye, 1993). Selon le même auteur, le mildiou (*Sclerospora graminicola*) ou lèpre du mil (Figure 2) est la maladie la plus dangereuse du mil dans le Sahel. Les pertes mondiales annuelles de rendement occasionnées par le mildiou sont estimées à 20 et 40 % (Singh, 1995). Le charbon du mil (*Moesiziomyces penicillariae*) occupe la deuxième place après le mildiou dans le Sahel (Mbaye, 1993). Le charbon du mil infecte les fleurs et les transforme en sores (sacs noirs) (Figure 3). Les pertes de rendement liées à cette maladie varient de 5 à 20 % (Moumouni, 2006). L'ergot (*Claviceps fusiformis*) est la troisième maladie la plus importante du mil (Figure 4). Il se forme des sclérotés à la place des graines au niveau des chandelles. Les pertes de graines peuvent atteindre 100 % (Mbaye, 1993)



Figure 2 : La lèpre du mil Figure 3 : La maladie du charbon Figure 4 : Symptôme d'ergot

Insectes : Le mil est attaqué par un nombre limité d'insectes comparé aux autres céréales. Cependant, ces attaques peuvent être importantes dans certaines régions de production en Afrique de l'Ouest. Les foreurs de tige (*Coniesta ignefusalis*), la mineuse de l'épi (*Heliocheilus albipunctella*), les cantharides (*Psalydolytta* spp.) et les cecidomyiides sont parfois importants dans les cultures du mil en Afrique (Ahmadi et *al.*, 2002).

Adventice : *Striga hermontica* est une espèce qui vit au dépend du mil et cause des dégâts appréciables (Mbaye, 1993). Plus de 40 % des superficies céréalières sont infectées par *S. hermontica* (Amadou, 2009). Les pertes de rendements liées par cette adventice sont comprises entre 90 à 100 % (Wilson et al., 2000).

Oiseaux granivores : Parmi les espèces d'oiseaux les plus nuisibles de la culture du mil on peut citer : *Quelea quelea* (travailleur à bec rouge), *Q erythrope* (travailleur à tête rouge), *Ploceus cucumillatus* (le gendarme) et *Passer luteus* (moineau doré) (Mbaye, 1993). Selon le même auteur, les pourcentages de dégâts sur le mil, le riz ou le sorgho varient de 10 à 30 % pour ces espèces nuisibles.

➤ **Contraintes socio-économiques**

La pression démographique dans les pays sahéliens a entraînée beaucoup de conséquences. Elle est à l'origine de la diminution de la période de jachère, de la fertilité des sols, ainsi qu'une expansion de l'aire de culture du mil et l'exploitation de terres marginales entraînant la baisse des rendements (FAO, 1997). La variabilité des dates de semis en début de campagne et la disponibilité des intrants (semence, fertilisation...) constituent des contraintes importantes dans la croissance de la plante. La culture du mil est surtout pratiquée par des paysans ne disposant pas de moyens suffisants pour investir dans les activités agricoles. Ils pratiquent une agriculture extensive avec peu d'utilisation d'intrants (Moumouni, 2014). L'utilisation des variétés locales ou traditionnelles peu résistantes aux maladies et parasites donnant ainsi de faibles rendements surtout dans un contexte de sols pauvres et de mauvaises pratiques culturales. Le stockage des récoltes et l'écoulement de la production se heurtent à de nombreuses difficultés, et l'absence de valorisation industrielle et commerciale du produit n'encourage pas la production.

1.2. Fertilisation et Densité de semis

La densité de semis, la fertilisation (les nutriments disponibles) et la pluviométrie vont fixer les limites du nombre de talles fertiles, de la période de floraison et donc de la réponse « plastique » du mil (Dutordoir, 2006)

1.2.1. Fertilisation

La fertilisation a pour but essentiel de maintenir ou d'accroître la richesse d'un sol en éléments organiques et/ou minéraux en vue d'améliorer la production des cultures. La pratique de la fertilisation des cultures a pour objectif de répondre aux besoins de la plante en nutriments essentiels pour sa croissance. Selon FNIE (1979), elle se base sur trois (3) lois fondamentales qui ont pour but essentiel d'entretenir la fertilité du sol pour satisfaire les besoins des cultures :

- ✓ **Loi de restitution** : les exportations d'éléments minéraux par les récoltes doivent être compensées par des restitutions pour éviter l'épuisement du sol.

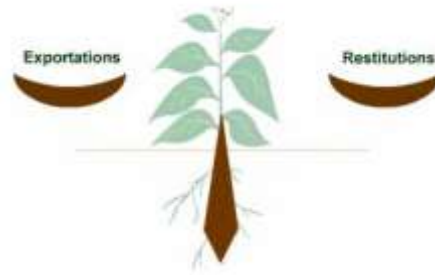


Figure 5: Loi de restitution

Source : UNIFA, 2005

- ✓ **Loi des accroissements moins que proportionnels** : Quand on apporte au sol des doses croissantes d'un élément fertilisant, les augmentations de rendement obtenues sont de plus en plus faibles au fur et à mesure que les quantités apportées s'élèvent.

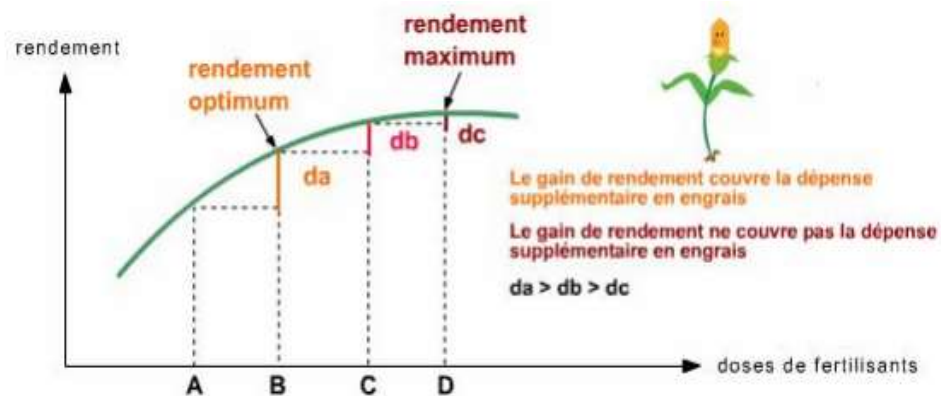


Figure 6: Loi des accroissements moins que proportionnels

Source : UNIFA, 2005

- ✓ **Loi du minimum ou d'interaction** : L'importance du rendement d'une récolte est déterminée par l'élément qui se trouve en plus faible quantité par rapport aux besoins de la culture. L'action d'un élément peut être modifiée par la présence ou l'absence d'un ou plusieurs autres éléments.



Figure 7: Loi du minimum

Source : UNIFA, 2005

On note deux types de fertilisation: la fertilisation organique et celle inorganique (minérale).

1.2.1.1. Fertilisation minérale

Les engrais minéraux sont utilisés pour apporter les éléments nutritifs essentiels tels que l'azote (N), le phosphore (P) et le potassium (K). On distingue les engrais simples qui ne contiennent qu'un élément fertilisant des engrais complexes pouvant contenir 2 ou 3 et même 4 éléments fertilisants. Ces éléments jouent un rôle essentiel dans la croissance et le développement du mil. L'absence ou la déficience d'un de ces éléments peuvent se répercuter sur la production en grain et en fourrage du mil.

➤ Azote (N)

L'azote est l'un des éléments nutritifs majeurs utilisés par les plantes (Epstein, 1972). Il est présent dans la nature sous deux états à l'état libre : sous forme de diazote (N₂), où il constitue 78 % de l'air que nous respirons et à l'état combiné, sous forme minérale ammoniacale, nitrite, nitrate ou sous forme organique. Les sources d'azote sont : le sol, les amendements organiques, les engrais minéraux et les plantes fixatrices d'azote (Bado, 2002). Selon Stevenson (1986), il favorise l'utilisation des hydrates de carbone, stimule le développement et l'activité racinaire, favorisant ainsi l'absorption des autres éléments minéraux et la croissance des plantes. Une application fractionnée (split application) permet d'augmenter considérablement l'efficacité de l'utilisation de l'azote par le mil (Bationo et Vlek, 1997). Les études de Campbell et *al.* (1991) ont montré un effet important de l'apport prolongé de l'engrais azoté sur l'accumulation de Carbone (C) dans les sols cultivés en céréales. Les expérimentations de Bationo et Buerkert (2001) montrent que le taux de fertilisation azotée optimum au niveau agronomique est de 30 kg N ha⁻¹ pour la culture du mil. Ganry et *al.* (1974) ont obtenu un rendement de l'ordre de 3 t ha⁻¹ avec 120 kg ha⁻¹ d'urée fractionnés en trois apports (semis, démaillage et montaison).

Les symptômes de carence en azote apparaissent d'abord sur les feuilles les plus âgées. La couleur jaune pâle se développe à la pointe des vieilles feuilles et se propage vers la base pour couvrir les feuilles entières. Les feuilles jaunes finalement brunissent, s'assèchent et meurent avec un tallage réduit (Zingore et *al.*, 2014).

➤ Phosphore (P)

Le phosphore intervient dans de nombreux métabolismes cellulaires chez les végétaux dans la photosynthèse des sucres comme fixateur d'énergie (FNIE, 1979). Il permet une meilleure croissance racinaire du mil, favorise un tallage plus actif avec des talles fertiles et agit sur le bon développement des grains en élevant leur valeur alimentaire (Lacharme, 2001). Muehlig-

Versen et *al.* (2003) notent que l'apport de P permet d'augmenter le nombre de panicules par poquet du mil et favorise le remplissage précoce des grains par rapport à des plants « témoins » non fertilisés. Bationo et Buerkert (2001) rapportent que l'application de 4 kg P ha⁻¹ (sous forme de NPK 15-15-15), permet de doubler l'efficacité d'utilisation de P par le mil et de diminuer de 70 % le coût d'investissement supporté par l'agriculteur comparée à l'application à la volée de 13 kg P ha⁻¹.

Une carence en phosphore se manifeste par une coloration particulière bleu-rougeâtre vers l'extérieure des feuilles, une croissance racinaire réduite, retard de maturité et une mauvaise formation des graines (IPNI, 2006). La carence en phosphore peut limiter les rendements des cultures (Kane, 2015).

➤ **Potassium (K)**

Le potassium est important pour la régulation ionique et osmotique (Dutordoir, 2006). Il favorise le tallage et accroît la taille et le poids des grains du mil. Il permet à la plante de mieux résister à la verse et aux attaques de maladies et d'insectes (Lacharme, 2001). Siband (1983) a mis en évidence le rôle du Potassium dans la croissance et le développement du mil. Il accroît le développement végétatif du mil par l'élongation des talles en augmentant la vitesse de croissance sans augmenter le cycle de sa culture et la multiplication du nombre de talles. Le potassium est très mobile dans la plante (FNIE, 1979). Selon Humble et Rashke (1971), il procure une meilleure résistance à la sécheresse en régulant l'ouverture des stomates. L'excès d'apport de potassium peut provoquer un déséquilibre cationique et anionique dans les fourrages (Thomas et Miner, 1996). Un apport de 25 kg K ha⁻¹ est recommandé pour une densité de semis de 10000 poquets ha⁻¹ (Hafner et *al.*, 1993).

Les symptômes apparaissent seulement dans les conditions de carence aiguë et surtout pendant les phases avancées de la croissance. Ils apparaissent d'abord sur les vieilles feuilles. La couleur brune sur les feuilles commence à partir de la pointe de la feuille et avance le long des bords vers la base (Zingore et *al.*, 2014).

Outre les éléments nutritifs primaires (N, P et K) la plante trouve dans le sol :

- Les trois (3) éléments nutritifs secondaires (le soufre, calcium et magnésium)
- Et les sept (7) microéléments (le bore, le chlore, le cuivre, le fer, le manganèse, le molybdène et le zinc).

➤ **Interaction entre les éléments minéraux**

La forme de l'azote (NH₄⁺ ou NO₃⁻) peut influencer la teneur des autres éléments dans le sol. L'ammonium (NH₄⁺) fait diminuer le taux d'absorption des cations tels que le potassium (K), le calcium (Ca), le magnésium (Mg) et le cuivre (Cu²⁺), alors que le nitrate (NO₃⁻) fait diminuer

celui des anions tels que le phosphore (P) et le soufre (S). Les niveaux de K et N sont relativement liés dans la plupart des plantes. En général, l'azote fait augmenter la sensibilité de la plante aux maladies, alors que le potassium (K) lui permet de mieux résister (Vidal, 1963). Dans les sols alcalins, l'engrais ammoniacal peut augmenter la disponibilité du phosphore (P) à cause de leur effet acidifiant. Selon Dutordoir (2006), l'application de N, particulièrement en combinaison avec P, stimule le tallage, la floraison hâtive et la fertilité des talles pour le mil. La fixation des apports de P et K est subordonnée donc à la connaissance de la dose d'azote économiquement applicable qui doit être définie par l'expérimentation au champ (Vidal, 1963). L'efficacité d'une fertilisation azotée est d'autant plus élevée que si la plante dispose suffisamment de phosphate et de potasse. Si un de ces deux éléments devient limitant, l'efficacité de la fertilisation azotée chute fortement (Lacharme, 2001).

1.2.1.2. Fertilisation organique

Les matières organiques utilisées dans la fertilisation des sols sont de nature et de formes diverses. Elles sont surtout constituées de fumier, de résidus de culture, des engrais verts, du compost. Le fumier est un amendement organique constitué d'un mélange de litières et d'excréments d'animaux ayant subi des fermentations plus ou moins poussées (Kéita, 1985). Il a un effet bénéfique sur les caractéristiques (texture, structure...) du sol. Les expérimentations De Rouw (1998) montrent un développement en vigueur des plants du mil sur les parcelles ayant reçues du fumier. Selon Sarr (1986), le fumier accroît significativement le nombre de talles, favorise la croissance linéaire et pondérale, augmente le nombre d'épis fructifiés par poquet ainsi que la surface de l'épi. Il confère au sol des propriétés physiques en participant au maintien de sa structure chimiques par la constitution de réserves disponibles pour les plantes et les animaux d'éléments nutritifs ou énergétiques (Masse et *al.*, 2005). En effet, l'apport prolongé de fumier de bovins, même à faible dose, permet d'enrichir le sol en Carbone (C) et en azote (N) (N'Dayegamiye et *al.*, 1997). Le fumier assure donc à la fois l'alimentation des plantes en libérant les éléments minéraux adsorbés et le stockage de ces éléments qui, sans cela, seraient lixiviés en raison de la très faible capacité d'adsorption des colloïdes minéraux (Dugué et Gigou, 2002). Au Sénégal, les quantités de matière organique préconisées est cependant importantes : 5 à 10 tonnes/ha (Ganry et *al.*, 1974).

1.2.1.3. Fertilisation organo-minérale

La fertilisation organo-minérale permet la gestion durable de la fertilité des sols en Afrique. L'utilisation d'engrais minéraux, associée à l'application d'engrais organiques est la solution pour soutenir la demande alimentaire croissante sans aggraver la dépendance du pays vis-à-vis

de l'aide alimentaire. Des expérimentations ont montré qu'une gestion rationnelle des engrais minéraux et des amendements organiques permettait d'augmenter les rendements des cultures et de maintenir durablement la fertilité des sols (Pichot et *al.*, 1981; Berger et *al.*, 1987 ; Pieri, 1989). Dutordoir (2006) rapporte un effet synergique de la combinaison d'apports organiques et minéraux sur les rendements en mil. La combinaison engrais minéraux et organiques diminue le risque d'acidification du sol et permet d'obtenir des systèmes de production productifs et durables (Bationo et Ntare, 2000). L'effet de cette combinaison sur les rendements du mil, est d'autant plus élevé qu'elle est associée à la rotation avec des légumineuses comme le niébé (Zeinabou et *al.*, 2014). Une fertilisation adéquate pour une production durable du mil est possible en utilisant une fumure organo-minérale (Traoré et *al.*, 2002).

1.2.2. Densité de semis

La densité de semis est le nombre de plant semés par unité de surface. Elle varie en fonction de la date et des conditions de semis (structure du lit de semence, humidité, présence ou non de cailloux, ...). Elle influence le taux de tallage du mil (Diouf, 1990). Différentes études recommandent des densités de semis plus élevées pour augmenter les rendements en cas d'utilisation d'engrais minéraux (Shapiro et Sanders, 1997). La hauteur des plants a tendance à augmenter quand la densité de semis augmente. Les densités élevées provoquent une compétition entre les plants pour la lumière au cours de la montaison entraînant un développement végétatif des plants (Siene et *al.*, 2010). Le mil est habituellement semé en poquets, dont l'espacement varie entre 0,45 m x 0,45 m et 1 m x 1 m en fonction du système de culture et de la nature du sol (Ahmadi et *al.*, 2002). Dans le Sahel, les agriculteurs sèment à de faibles densités (10 000 à 30 000 plants ha⁻¹) et pratiquent le démariage pour favoriser le tallage et pour que les talles fertiles contribuent au rendement en grain (Bidinger et Raju, 2000). Au Niger, en sols sableux, on sème à 1 m x 1 m soit 10 000 poquets/ha (Illiassou, 2009). Au Sénégal, la densité la plus répandue pour le mil en milieu paysan est de 12 346 poquets à l'hectare qui correspond à des écartements de 0,90 m x 0,90 m (Sien et *al.*, 1991). En Casamance, le semis est effectué manuellement en poquet avec un espacement de 0,90 m x 0,9 m. Le démariage doit intervenir 8 à 10 jours après la levée et au plus tard trois semaines après la levée (Havard, 1986). Selon le même auteur, les interlignes de semis varient entre 0,70 m à 0,90 m dans le Sud Sine-Saloum. La densité de semis peut influencer le rendement en grains et/ou la production de fourrage.

Chapitre 2 : Matériel et Méthodes

2.1. Description du site d'étude

2.1.1. Présentation du site d'étude

L'essai est mis en place au Centre de Recherches Zootechniques (CRZ) de Kolda en Juillet 2017. La région de Kolda (Figure 8) est située au Sud du Sénégal, dans la haute Casamance. Le sol du site d'expérimentation est de type sablo-argileux. Le climat est de type soudano-guinéen, chaud et humide. Les moyennes pluviométriques régionales annuelles varient entre 700 et 1300 mm (MCA, 2009). La région de Kolda est caractérisée par deux (2) grandes périodes : une période avec des températures élevées (température moyenne maximale 40° C et minimale 23,5°C) enregistrées durant les mois de mars, avril, mai et une période à températures plus basses (température moyenne maximale 34,9°C et minimale 20,6°C) de juillet à février. La zone est caractérisée par une humidité moyenne maximale de 81,3 % et un minimal de 39,5 %. Les mois d'août et de septembre ont l'humidité maximale (96 %) tandis que celle minimale est enregistrée durant le mois de février (13 %) (ANSD, 2012).

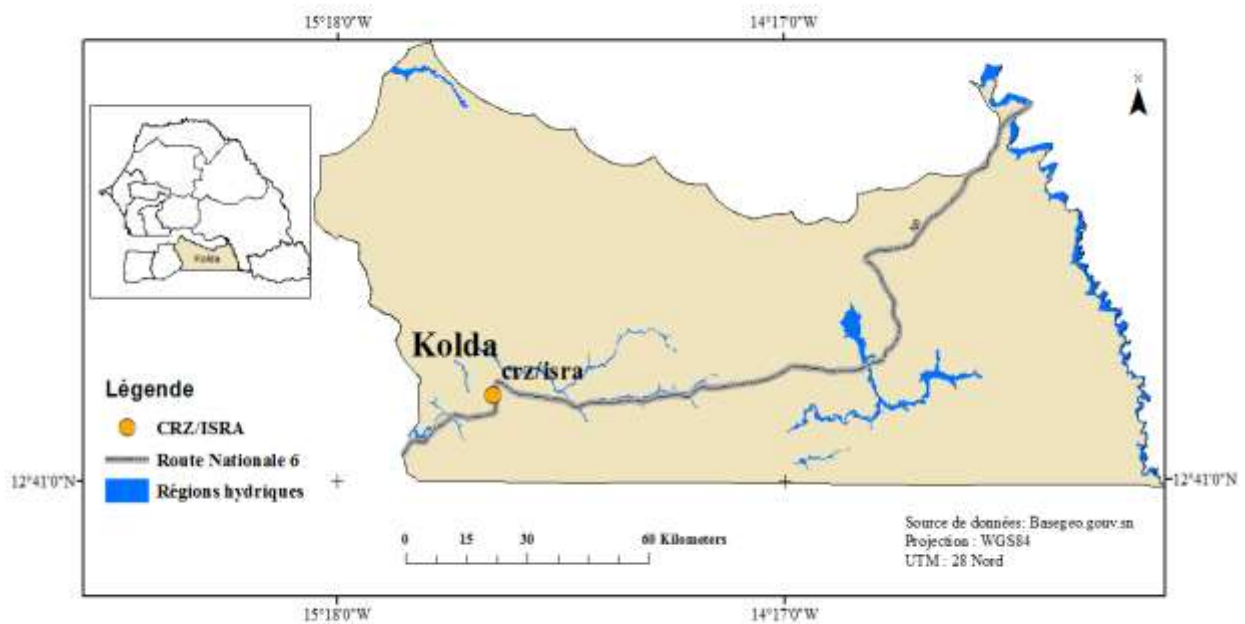


Figure 8: Localisation de la station de l'ISRA/CRZ de Kolda

2.1.2. Données pluviométriques de la campagne

Les données pluviométriques sont enregistrées à l'aide d'un pluviomètre installé sur le site d'expérimentation. Le pluviomètre est un pot transparent gradué en millimètre. La détermination de la quantité de pluie se fait par une lecture directe de ces graduations jusqu'au

niveau de l'eau. La quantité de pluie est enregistrée par jour. Les observations ou lectures du pluviomètre sont faites chaque matin. Le cumul des précipitations durant cette campagne est de 1335 mm en 46 jours de pluie. La Figure 9 donne la distribution décadaire des précipitations.

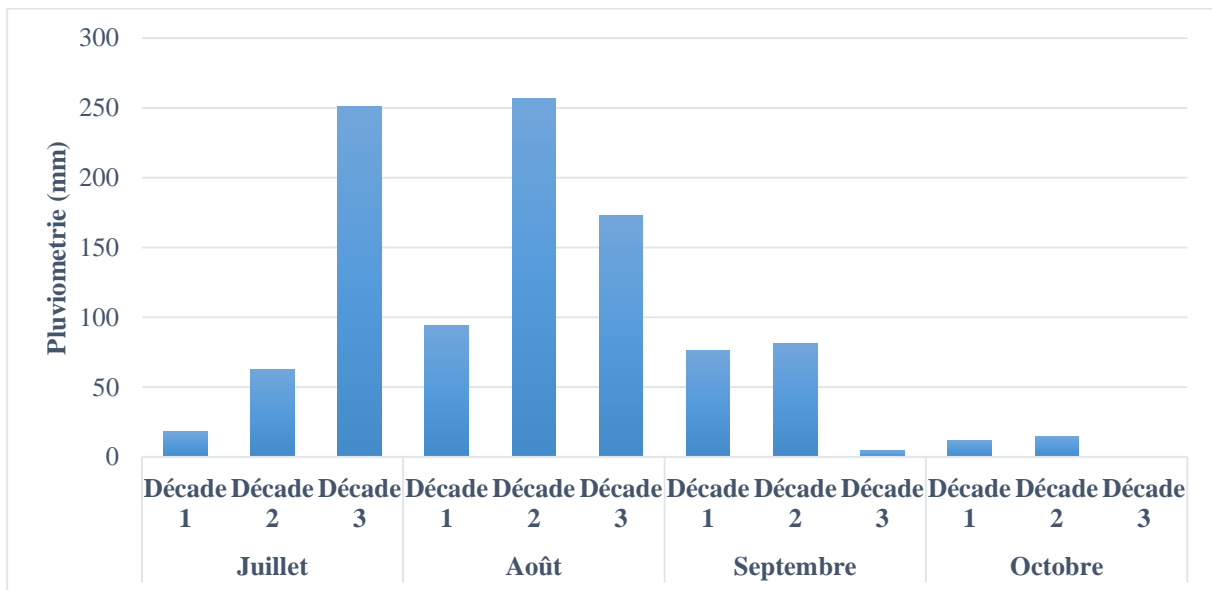


Figure 9 : Evolution du cumul décadaire de la pluviométrie 2017 à la station météorologique du CRZ/Kolda

2.2. Matériel

2.2.1. Matériel végétal

La variété de mil dite Sanio est utilisée pour cette étude. C'est un mil tardif avec un cycle de développement long (100 à 150 jour). Le Sanio a un développement en hauteur et en nombre de talles importants (Dancette, 1983). Il est plus productif et apprécié pour les qualités gustatives de son grain (Clément, 1984). Sa culture est pratiquée dans les zones où la pluviométrie est relativement abondante.

2.2.2. Fertilisants

Des engrais minéraux simples: DSP (25 % P), Urée (46 % N) et KCL (61,3 % K) sont apportés de même que de la bouse de vache.



Figure 10 : DSP 25 % P



Figure 11 : Urée 46 % N

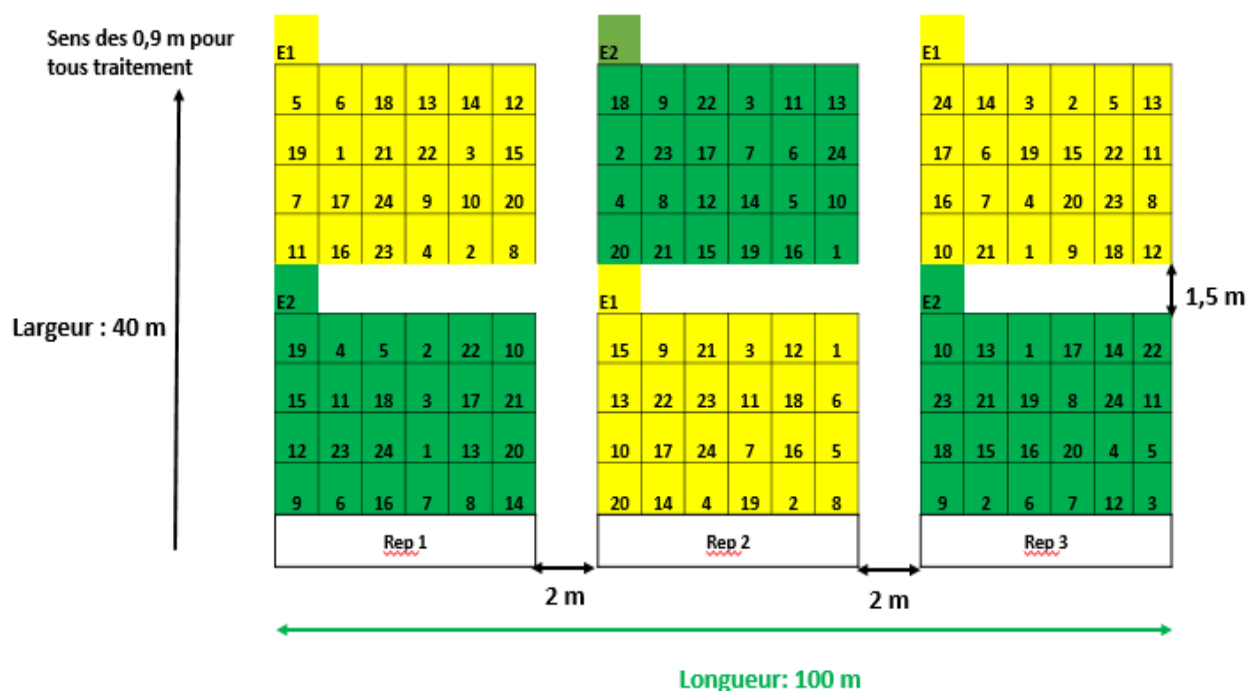


Figure 12 : KCl 61,3 % K

2.3. Méthodes

2.3.1. Dispositif expérimental

Le dispositif est en Split plot avec comme facteur primaire la densité de semis et la fertilisation comme facteur secondaire. Il est constitué de trois (3) répétitions. La longueur de l'essai est de 100 m pour une largeur de 40 m soit une dimension de 4 000 m² (0,4 ha) (Figure 13). L'espacement entre les blocs est de 2 m. Au sein d'un même bloc, l'espacement entre les facteurs primaires est de 1,5 m. Chaque facteur primaire est divisé en 24 petites parcelles correspondant aux options de fertilisations (facteur secondaire). Au niveau des petites parcelles sont semés 5 poquets sur 5 lignes soit 25 poquets par petite parcelle.



E1 = Jaune = Densité 1 : E2 = Vert = Densité 2 : Rep = Répétition = Bloc

Figure 13 : Dispositif expérimental

2.3.2. Facteurs étudiés

Les facteurs étudiés sont :

- **Facteur primaire** : Densité de semis à 2 niveaux
 - Densité 1 (E1) : 0,9 m x 0,9 m soit 12 346 poquets à l'hectare.
 - Densité 2 (E2) : 0,9 m x 0,45 m soit 24 691 poquets à l'hectare.
- **Facteur secondaire** : Fertilisation à 24 niveaux (Voir Tableau 1 et 2)

Les fertilisants évalués sont les engrais minéraux (simples et composés), les engrais organiques et les engrais organo-minéraux. Les différentes compositions et formules d'engrais sont résumées dans les Tableaux 1 et 2.

Pour la densité 0,9 m x 0,9 m (12 346 poquets par ha) les niveaux d'azote (N) varient de 0 à 103 kg de N par ha soit 224 kg d'urée ; ceux du phosphore (P) de 0 à 37,125 kg de P ha⁻¹ soit 148 kg de DSP et ceux du potassium (K) de 0 à 29,25 kg de K ha⁻¹ soit 48 kg de KCl. Les doses évaluées de matière organique (MO) seule ou en combinaison avec l'engrais minéral sont : 50 % de la Dose recommandée (DR) soit 2,5t ha⁻¹, 100 % de la DR soit 5t ha⁻¹ ; 125 % de la DR soit 7,5t ha⁻¹ et enfin 50 % de la DR de MO (2,5 t ha⁻¹) + 50 % de la DR de NPK (75 kg de NPK 15-15-15 + 50 kg d'Urée à la montaison).

Tableau 1 : Composition des formules d'engrais pour la densité 1 (0,9 m x 0,9 m)

Types d'engrais	Formules	Dose d'engrais/poquet				Dose d'engrais/ha		
		Urée	DSP	KCl	Urée	DSP	KCL	
Témoin	T1	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0	0
Engrais minéraux simples	T2	12,1	6,0	0,0	0,0	149	0	0
	T3	0,0	0,0	7,3	0,0	0	90	0
	T4	0,0	0,0	0,0	3,0	0	0	37
	T5	12,1	6,0	7,3	3,0	149	90	37
Engrais minéraux composés	T6	4,0	2,0	7,3	3,0	49	90	37
	T7	8,0	4,0	7,3	3,0	99	90	37
	T8	10,0	5,0	7,3	3,0	124	90	37
	T9	14,1	7,0	7,3	3,0	174	90	37
	T10	16,1	8,1	7,3	3,0	199	90	37
	T11	18,1	9,1	7,3	3,0	224	90	37
	T12	12,1	6,0	8,7	3,0	149	108	37
	T13	12,1	6,0	9,8	3,0	149	121	37
	T14	12,1	6,0	10,9	3,0	149	135	37
	T15	12,1	6,0	12,0	3,0	149	148	37
	T16	12,1	6,0	7,3	3,3	149	90	40
	T17	12,1	6,0	7,3	3,6	149	90	44
	T18	12,1	6,0	7,3	3,9	149	90	48
	T19	14,1	7,0	8,7	3,3	174	108	40
	T20	16,1	8,1	9,8	3,6	199	121	44
Engrais organiques	T21	202 g				2,5 t/ha		
	T22	404 g				5 t/ha		
	T23	607 g				7,5 t/ha		
Engrais organo-minéraux	T24	202 g MO + 12,3 g d'urée + 7,3 g DSP + 3 g KCl				2,5 tonnes de MO + 150 kg d'urée + 90 kg DSP + 37 Kg KCL		

Pour la densité 0,9 m x 0,45 m (24 691 poquets par ha), les quantités de N varient de 0 à 149 kg par ha soit 324 kg d'urée ; ceux du Phosphore (P) de 0 à 67,5 kg par ha soit 270 kg de DSP et ceux du potassium (K) de 0 à 39,375 kg par ha soit 64 kg de KCl. Les quantités de matières organiques utilisées sont : 405 g/poquets (10 t/ha), 506 g/poquet (12 t/ha) et 607 g/ha (15 t/ha). La combinaison organo-minéraux par poquet est constituée de 202 g MO + 5 g Urée + 2,5 g DSP 1,5 g KCl soit 5 tonnes de MO + 122 kg d'urée + 62 Kg DSP + 37 kg KCL 150 Kg de NPK.

Tableau 2: Composition des formules d'engrais pour la densité 2 (0,9 m x 0,45 m)

Types d'engrais	Formules	Dose d'engrais/poquet				Dose d'engrais/ha		
		Urée		DSP	KCl	Urée	DSP	KCL
Témoin	T1	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0	0
Engrais minéraux simples	T2	6,0	3,0	0,0	0,0	149	0	0
	T3	0,0	0,0	3,6	0,0	0	90	0
	T4	0,0	0,0	0,0	1,5	0	0	37
	T5	6,0	3,0	3,6	1,5	149	90	37
Engrais minéraux composés	T6	2,0	1,0	3,6	1,5	49	90	37
	T7	8,1	4,0	3,6	1,5	199	90	37
	T8	10,1	5,0	3,6	1,5	249	90	37
	T9	11,1	5,5	3,6	1,5	274	90	37
	T10	12,1	6,1	3,6	1,5	299	90	37
	T11	13,1	6,6	3,6	1,5	324	90	37
	T12	8,1	4,0	7,3	1,5	199	180	37
	T13	8,1	4,0	8,2	1,5	199	203	37
	T14	8,1	4,0	9,1	1,5	199	225	37
	T15	8,1	4,0	10,9	1,5	199	270	37
	T16	8,1	4,0	3,6	1,9	199	90	46
	T17	8,1	4,0	3,6	2,2	199	90	55
	T18	8,1	4,0	3,6	2,6	199	90	64
	T19	12,1	6,1	9,1	1,9	299	225	46
	T20	13,1	6,6	10,9	2,2	324	270	55
Engrais organiques	T21	405 MO g				10 t/ha		
	T22	506 MO g				12,5 t/ha		
	T23	607 MO g				15 t/ha		
Engrais organo-minéraux	T24	202 g MO + 5 g d'urée + 2,5 g DSP 1,5 g KCl par poquet				5 tonnes de MO + 122 kg d'urée + 62 kg DSP + 37 kg KCL		

2.3.3. Observations et mesures

L'unité expérimentale (Parcelle élémentaire) est de 5 x 5 soit 25 poquets à l'intérieur de laquelle est délimité un carré de rendement de 3 x 3 soit 9 plants (plants en verts) sur lesquels sont faites les mesures et observations (Figure 14).

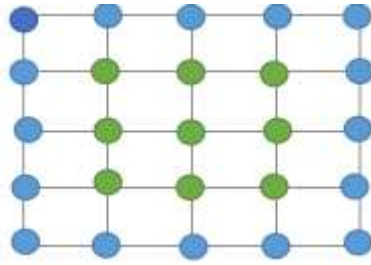


Figure 14 : Parcelle élémentaire

Les paramètres agronomiques qui ont fait l'objet de mesures ou d'observations sont les suivants

- **Nombre total de Talles (fructifères et non fructifères)**

Cette opération est effectuée pendant la phase de montaison au 50^{ème} Jours Après Semis (JAS). Le nombre de talles (fructifères et non fructifères) de chaque poquet est relevé.

- **Croissance en hauteur des plants par poquet**

Quatre (4) mesures sont réalisées pour la hauteur des plants avec une règle graduée. L'intervalle entre les mesures est de 15 Jours (50 JAS, 65 JAS, 80 JAS et 95 JAS). Elle a concerné la partie allant du collet à la feuille la plus longue ou la chandelle la plus longue dans le poquet.

- **Teneur en chlorophylle des feuilles**

L'appareil SPAD (Figure 15) est utilisé pour mesurer la teneur en chlorophylle des feuilles des plantes sans les détériorer. L'échelle de mesure de cet appareil est sans unité et peut varier de 0 à 80, avec les valeurs élevées correspondant à des feuilles d'un vert plus foncé (Dwyer et *al.*, 1994). La teneur en chlorophylle indique l'état de la plante et permet de déterminer à quel moment ajouter un fertilisant pour améliorer le rendement des récoltes. La mesure est faite sur la dernière feuille des plants du carré de rendement.



Figure 15 : Mesure de la teneur en chlorophylle à l'aide du Spad

- Rendement grains et biomasse sèche

Après la récolte, le rendement est déterminé dans chaque parcelle élémentaire. Le poids de la paille sèche, le rendement grain sont évalués à l'aide d'un peson de portée 50 kg. Les rendements grains et biomasse en kg/ha sont calculés à partir du poids de grains et de la biomasse des plants de la parcelle élémentaire et ensuite extrapolée à l'hectare selon la formule suivante:

Pour la densité 1 (0,9 m x 0,9 m) : $R = (r \times 12\ 346)/n$

Pour la densité 2 (0,9 m x 0,45 m) : $R = (r \times 24\ 691)/n$

R = rendement à l'hectare ;

r = rendement sur la parcelle élémentaire ;

n = nombre de pieds par parcelle élémentaire carré (n = 9 plants).

- Poids de mille grains (PMG)

Le comptage pour le poids de mille grains (PMG) est effectué avec le Numigral (Figure 16) puis les grains de mil sont pesés avec une balance électronique de précision (Figure 17).



Figure 16 : Numigral



Figure 17 : Balance électronique

2.3.4. Analyses statistiques

Le logiciel Excel a servi à la saisie des données ainsi qu'à la réalisation des graphiques. L'analyse de variance (ANOVA) et les boîtes à moustaches sont réalisées avec le logiciel GenStat Discovery version 17. Le test de Newman-Keuls a servi à séparer les moyennes lorsque l'ANOVA s'est révélée significative au seuil de 5 %.

Chapitre 3 : Résultats et Discussion

3.1. Résultats

3.1.1. Effets de la densité de semis et de la fertilisation sur les paramètres agromorphologiques

3.1.1.1. Evolution de la hauteur des plants du mil en fonction de la densité de semis

Les analyses graphiques et statistiques de la Figure 18 montrent que quelle que soit la date de mesure considérée, la densité 2 (0,9 m x 0,45 m) présente un développement en hauteur plus élevé que la densité 1 (0,9 m x 0,9 m). En effet, l'analyse de variance a révélé une différence hautement significative entre les densités de semis pour le 65^{ème} et le 80^{ème} Jours Après Semis (JAS) où une croissance active des plants du mil est notée. Par contre, pour la première (50^{ème} JAS) et la dernière date (95^{ème} JAS) aucune différence significative n'a été notée entre les deux densités de semis.

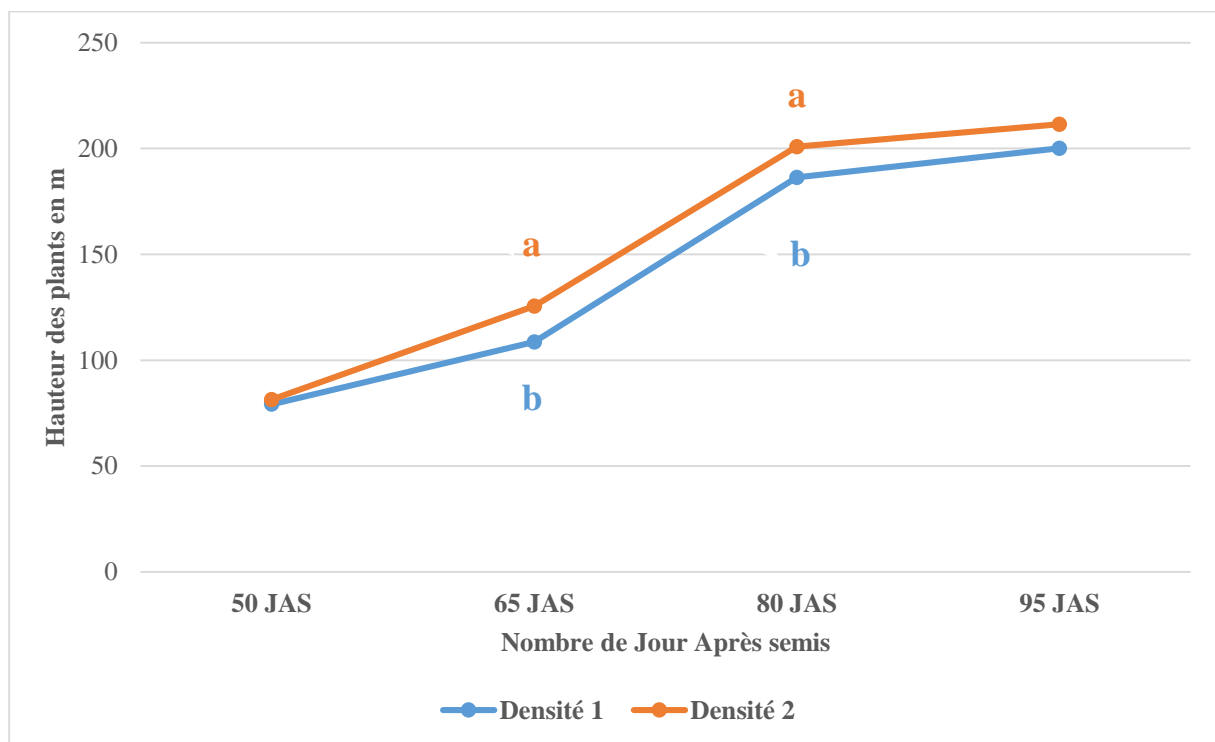


Figure 18 : Evolution de la hauteur des plants en fonction de la densité de semis

3.1.1.2. Effets de la fertilisation sur le nombre de talles

Les Figures 19 et 20 présentent les effets de la fertilisation sur le nombre de talles en fonction de chaque densité de semis. Il ressort des données obtenues dans la densité 1 que les nombres de talles les plus importants sont notés avec les formules d'engrais minéraux composés comme la T18 (149 kg Urée + 90 kg DSP + 48 kg KCL) et la T20 (199 kg Urée + 121 kg DSP + 44 kg KCL). Ces deux formules d'engrais appartenant au même groupe sont statistiquement différentes par rapport au témoin T1 (sans engrais). Au niveau de la densité 2, l'analyse de variance indique que le nombre de talles par plant n'est pas significativement affecté par les différentes formules d'engrais.

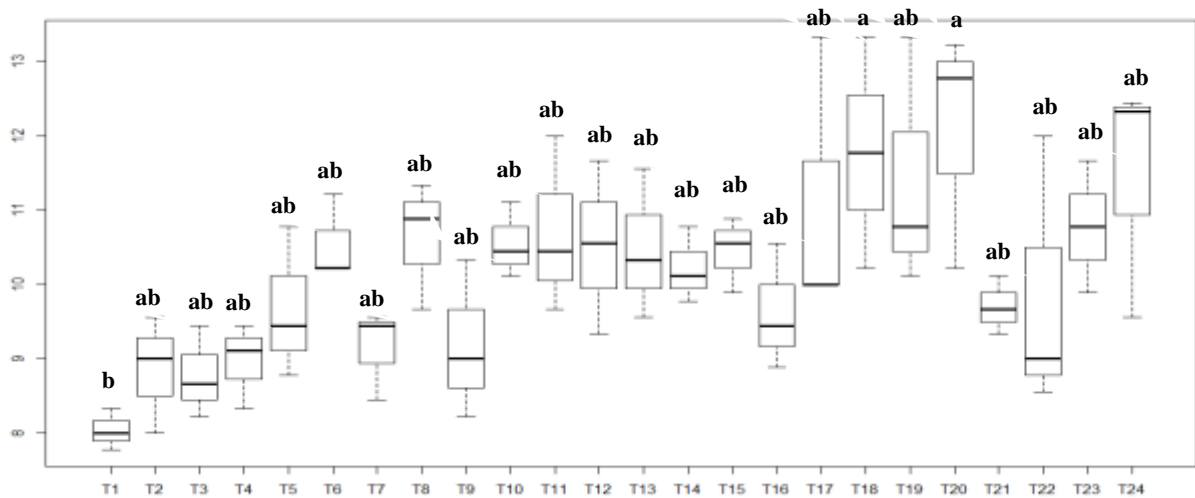


Figure 19 : Effets des formules d'engrais sur le nombre de talles pour la densité 1

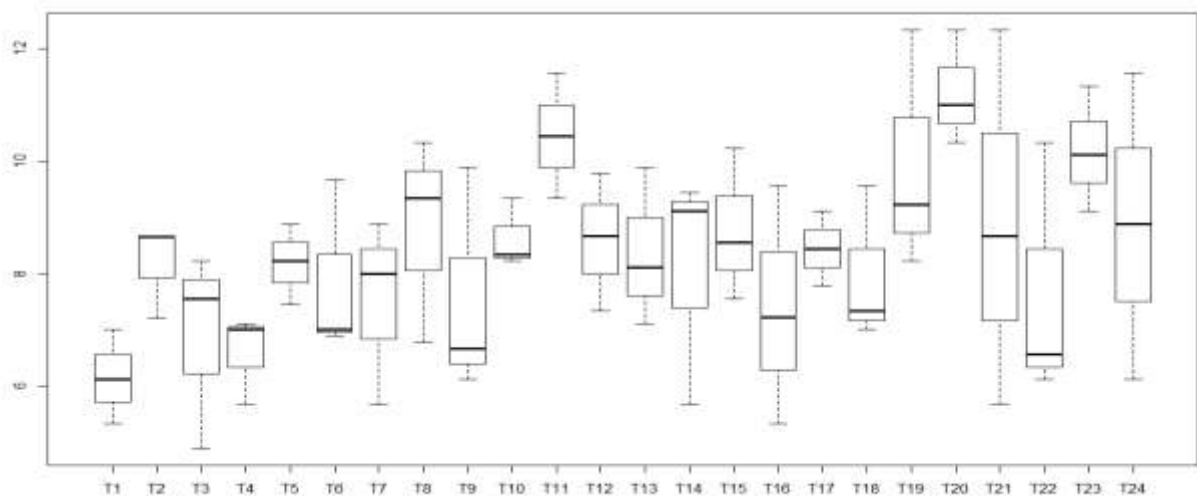


Figure 20 : Effets des formules d'engrais sur le nombre de talles pour la densité 2

3.1.1.3. Effets de la fertilisation sur le pourcentage de talles fructifères

L'analyse de variance des Figures 21 et 22 révèle une interaction significative des facteurs étudiés. Les données obtenues avec la densité 1 (0,9 m x 0,9 m) révèlent des différences significatives entre le témoin T1 (sans engrais) et les parcelles fertilisées. Pour la densité 2 (0,9 m x 0,45 m), le pourcentage de talles fructifères est proportionnel à l'augmentation de la dose d'engrais. Les valeurs les plus importantes sont obtenues avec les formules d'engrais ayant bénéficiés des doses élevées : T23 (15 t/ha MO), T18 (199 kg Urée + 90 kg DSP + 64 kg KCL), T19 (299 kg Urée + 225 kg DSP + 46 kg KCL), T11 (324 kg Urée + 90 kg DSP + 37 kg KCL), T20 (324 kg Urée + 270 kg DSP + 55 kg KCL) et la T24 (2,5 t/ha MO + 150 kg Urée + 90 kg DSP + 37 Kg KCL) qui sont statistiquement homogènes.

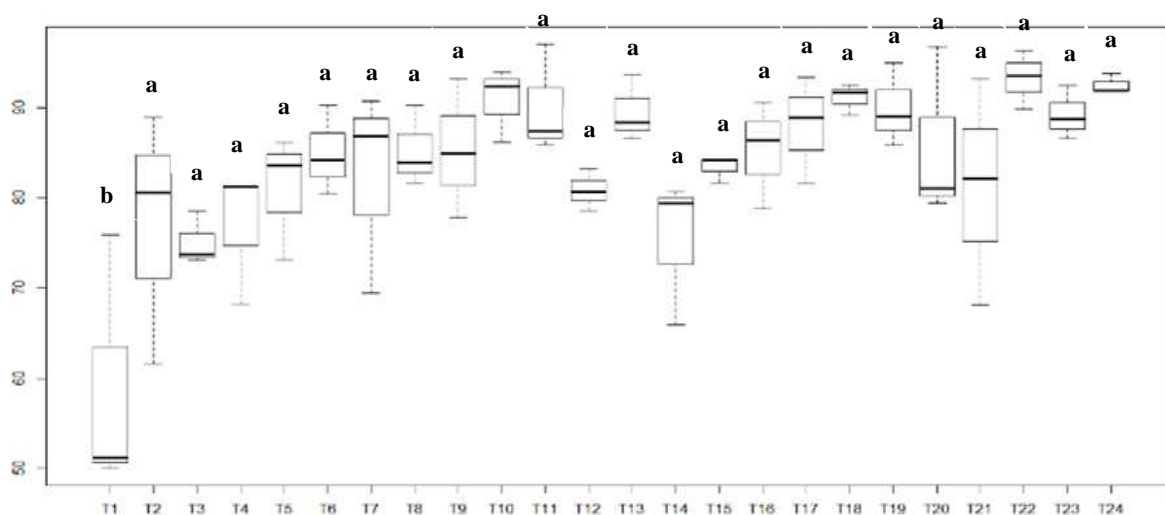


Figure 21 : Effets des formules d'engrais sur le pourcentage de talles fructifères pour la densité 1

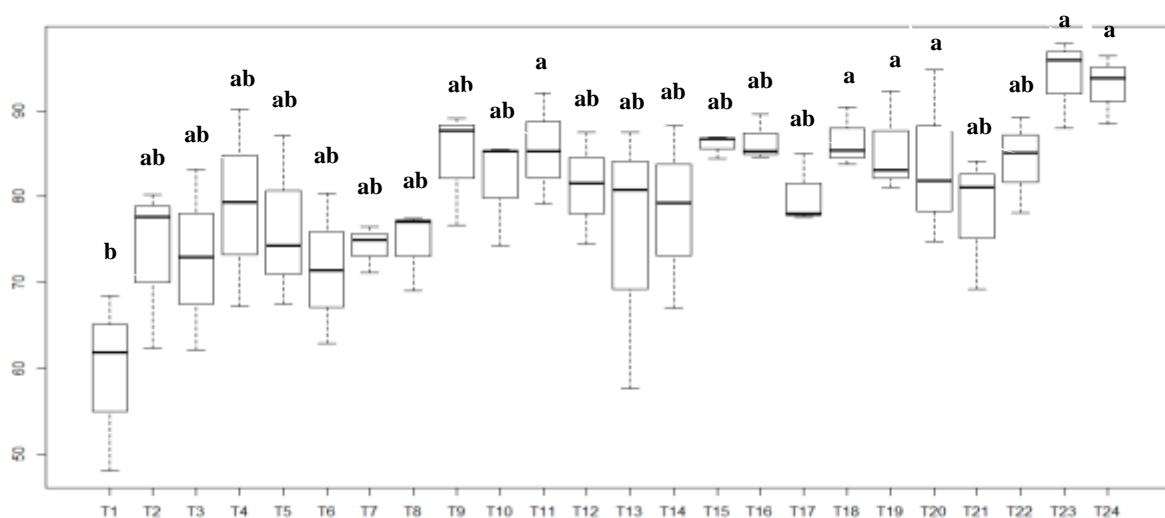


Figure 22 : Effets des formules d'engrais sur le pourcentage de talles fructifères pour la densité 2

3.1.1.4. Effets de la fertilisation sur la teneur en chlorophylle

Les résultats des effets de la fertilisation sur la teneur en chlorophylle sont consignés dans les Figures 23 et 24. L'analyse de variance révèle une différence significative pour l'interaction entre les différents facteurs. Au niveau de la densité 1 la teneur en chlorophylle varie d'une formule d'engrais à une autre. L'analyse statistique met en évidence 4 groupes. Les formules d'engrais T10 (174 kg Urée + 90 kg DSP + 37 kg KCL), T11 (199 kg Urée + 90 kg DSP + 37 kg KCL), T18 (149 kg Urée + 90 kg DSP + 48 kg KCL), T19 (174 kg Urée + 108 kg DSP + 40 kg KCL) et T23 (7,5 t/ha MO) forment le groupe ayant enregistré la teneur en chlorophylle la plus importante. Le témoin T1 (sans engrais) et la formule d'engrais minéral simple T3 (90 kg DSP) représentent respectivement les deux groupes ayant les teneurs en chlorophylles les plus faibles. Cependant pour la densité 2 la teneur en chlorophylle des plants n'est pas affectée par les différentes formules d'engrais.

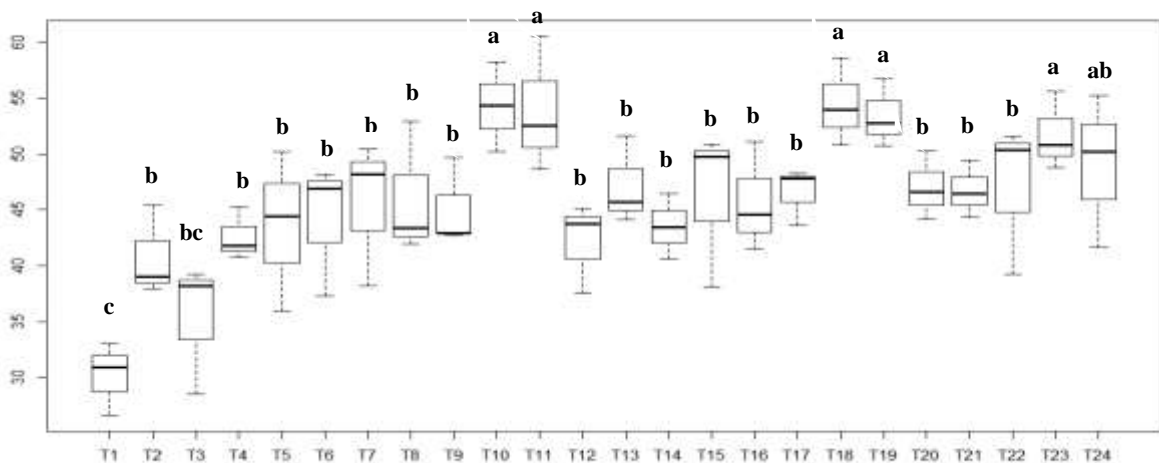


Figure 23 : Effets des formules d'engrais sur la teneur en chlorophylle pour la densité 1

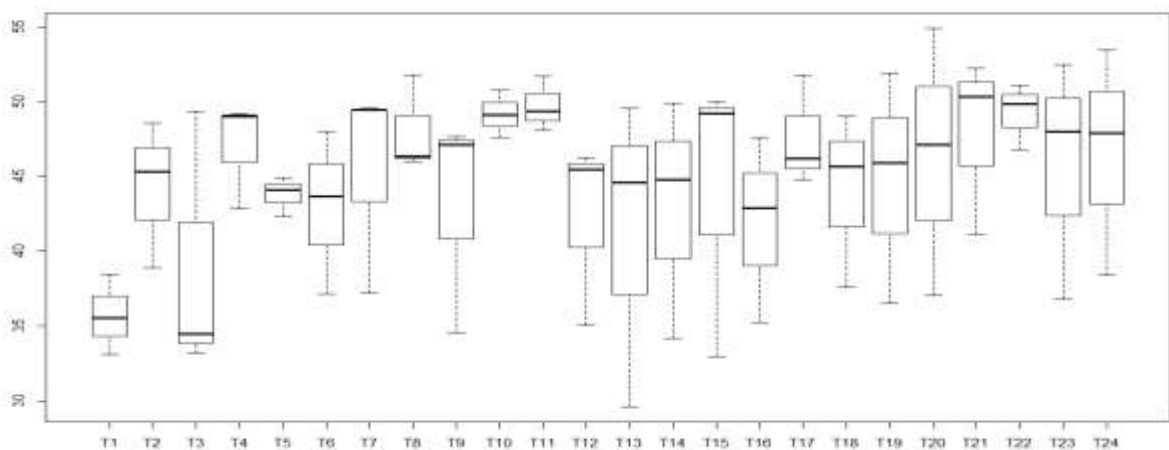


Figure 24 : Effets des formules d'engrais sur la teneur en chlorophylle pour la densité 2

3.1.2. Effets de la densité de semis et de la fertilisation sur la biomasse sèche et sur le rendement grain

3.1.2.1. Effets de la densité de semis et de la fertilisation sur la biomasse sèche

La Figure 25 met en évidence les effets de la densité de semis et des formules d'engrais sur le rendement en biomasse sèche du mil. Une différence hautement significative est notée au niveau de l'interaction. Pour la densité 1 (0,9 m x 0,9 m), les rendements varient d'une formule d'engrais à une autre et sont compris entre 1600 kg/ha pour le témoin T1 à 5185 kg/ha pour la T20. Les formules d'engrais minéraux composés T20 (174 kg Urée + 108 kg DSP + 40 kg KCL), T19 (174 kg Urée + 108 kg DSP + 40 kg KCL) et celles des engrais organiques T23 (7,5 t/ha MO) et T22 (5 t/ha de MO) présentent les rendements en biomasse sèche les plus importants avec des valeurs respectives 5185 kg/ha, 5075 kg/ha, 4993 kg/ha et 4990 kg/ha. Le rendement le plus faible est enregistré avec le témoin T1 (sans engrais) avec 1600 kg/ha de biomasse sèche. Au niveau de la densité 2 (0,9 m x 0,45 m), les rendements en biomasse sèche (RBS) sont compris entre 3184 kg/ha pour le témoin T1 à 5304 kg/ha pour la T23. Les RBS sont classés en 6 groupes statistiquement différents. La T23 (15 t/ha MO) présente le RBS le plus important avec 5304 kg/ha suivi du groupe composé des formules d'engrais T20 (324 kg Urée + 270 kg DSP + 55 kg KCL) et T22 (12,5 t/ha MO) avec des rendements en biomasse sèche respectifs 4995 kg/ha et 4993 kg/ha. Les rendements les plus faibles sont notés avec le témoin T1, la T2 (149 kg Urée) et la T8 (248 kg Urée + 90 kg DSP + 37 kg KCL) qui forment un groupe avec des RBS respectifs 3184 kg/ha, 3548 kg/ha et 3621 kg/ha.

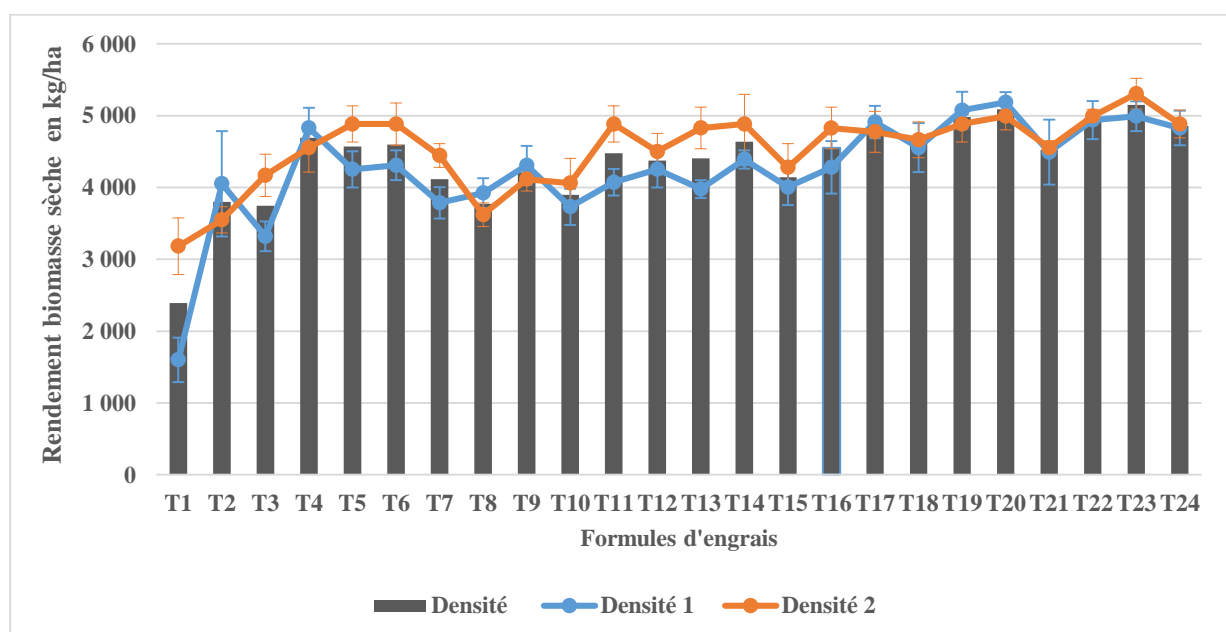


Figure 25 : Effets de la densité de semis et des formules d'engrais sur la biomasse sèche

3.1.2.2. Effets de la densité de semis et de la fertilisation sur le rendement en grain

La Figure 26 présente les effets de la densité de semis et de la fertilisation sur le rendement en grain. Au niveau de la densité 2 (0,9 m x 0,45 m), une évolution croissante en fonction des formules d'engrais est notée pour le rendement grain. Les rendements sont compris entre 1115 kg/ha pour le témoin T1 à 3022 kg/ha pour la T20. Les résultats sur le rendement moyen en grain montrent que les formules d'engrais minéraux composés la T20 (324 kg Urée + 270 kg DSP + 55 kg KCL) avec 3022 kg/ha et la T11 (324 kg Urée + 90 kg DSP + 37 kg KCL) avec 2889 kg/ha forment un groupe homogène ayant le rendement le plus important. Le témoin T1 (sans engrais) et les engrais simples T3 (90 kg DSP) et T4 (37 kg KCL) forment un groupe ayant enregistré les rendements en grain avec des valeurs respectives 1115 kg/ha, 1357 kg/ha et 1390 kg/ha. Pour la densité 1 (0,9 m x 0,9 m), les rendements varient d'une formule d'engrais à une autre dans l'intervalle 736 kg/ha pour le témoin T1 à 2053 kg/ha pour la T23. Le meilleur rendement en grain est obtenu avec le groupe composé des formules d'engrais comme la T23 (7,5 t/ha MO) avec 2053 kg/ha, la T20 (199 kg Urée + 121 kg DSP + 44 kg KCL) avec 2050 kg/ha et la T19 (174 kg Urée + 108 kg DSP + 40 kg KCL) avec 2014 kg/ha. Les rendements en grain les plus faibles sont observés avec le groupe composé du témoin T1 et des formules d'engrais simples T3 (90 kg DSP) et la T2 (149 kg Urée) avec des valeurs en grain respectives 736 kg/ha, 861 Kg/ha et 896 kg/ha.

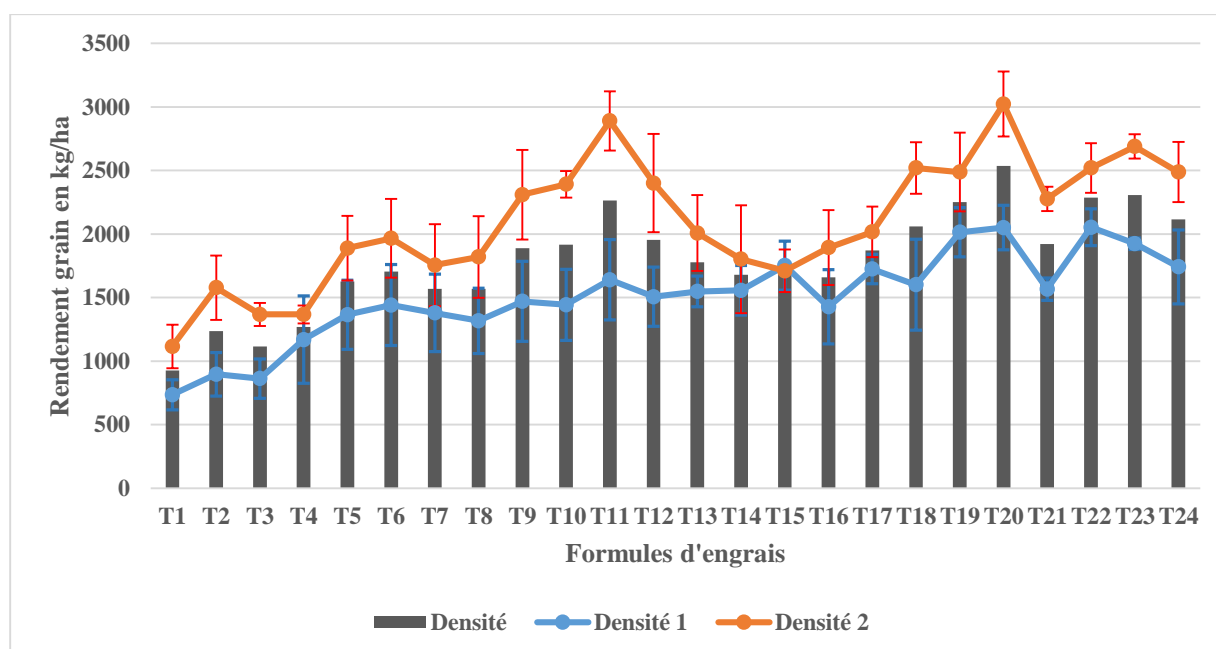


Figure 26 : Effets de la densité de semis et des formules d'engrais sur le rendement en grain

3.1.2.3. Effets de la densité de semis et de la fertilisation sur le Poids de Mille Grains (PMG)

Les données consignées dans la Figure 27 montrent que l'interaction n'a aucun effet sur le poids de mille grains du mil (PMG). Pour la densité 1 (0,9 m x 0,9 m), le PMG varie suivant les doses et les types d'engrais. En effet, l'analyse statistique révèle une différence significative entre les formules d'engrais. La T22 (5 t/ha MO), la T20 (199 kg Urée + 121 kg DSP + 44 kg KCL), la T19 (174 kg Urée + 108 kg + DSP 40 kg KCL) et la T23 (7,5 t/ha MO) forment le groupe ayant le PMG le plus important. Le PMG le plus faible est noté avec le témoin T1 (4,1 g) qui est statistiquement différent des autres formules d'engrais. Au niveau de la densité 2 (0,9 m x 0,45 m), la comparaison des moyennes entre les différentes formules d'engrais a montré que les engrais minéraux composés : T20 (324 kg Urée + 270 kg DSP + 55 kg KCL) et T11 (324 kg Urée + 90 kg DSP + 37 kg KCL) se caractérisent par le groupe de PMG le plus important. Le témoin T1 (sans engrais) et les engrais minéraux simples T3 (90 kg DSP) et T4 (37 kg KCL) ont entraîné les plus faibles PMG.

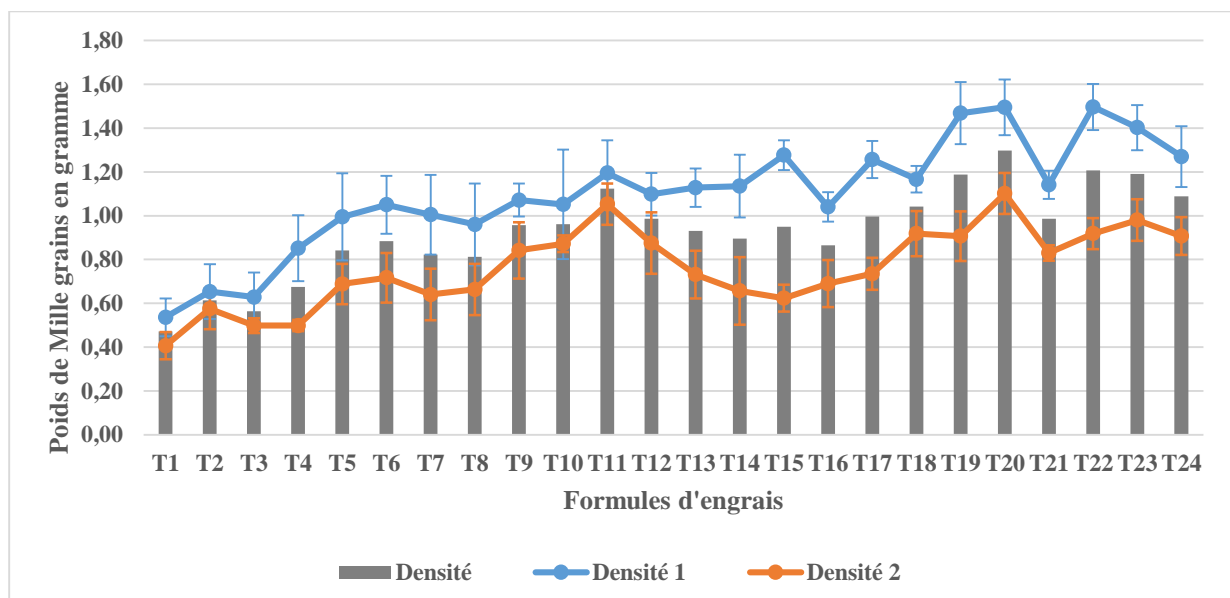


Figure 27 : Effets de la densité de semis et des formules d'engrais sur le poids de mille grains

3.2. Discussion

3.2.1. Effets de la densité de semis et de la fertilisation sur les paramètres agromorphologiques

3.2.1.1. Effets de la densité de semis sur l'évolution en hauteur des plants

Les hauteurs les plus élevées sont notées avec la densité la plus élevée. Ce qui pourrait s'expliquer par une plus forte compétition entre les plants pour la lumière. D'après Illiassou

(2009), la hauteur des plants du mil a tendance à augmenter quand la densité de semis augmente. La croissance active du mil notée entre le 65^{ème} et le 80^{ème} JAS est influencée par la diminution de la durée de la journée. Selon Vidal (1963), la montaison du mil se caractérise par un allongement inter-nodal considérable des tiges. Ces résultats corroborent aussi l'étude de Thomas (1998) concernant la relation entre le développement des plantes et la durée du jour.

3.2.1.2. Effets de la densité de semis et de la fertilisation sur le nombre de talles

La densité la plus élevée a produit moins de talles par poquet. Une forte densité de semis favorise une exploitation plus rapide des ressources entraînant une augmentation de la concurrence entre les plants du mil pour l'humidité, la lumière et les éléments nutritifs. Plusieurs auteurs (Siene et *al.*, 2010 ; Moulia et *al.*, 1999) ont montré que la diminution du nombre de talles varie avec l'augmentation de la densité de semis.

Les fortes doses d'engrais minéraux composés (NPK) ont donné le nombre de talles le plus élevé comparées au témoin. Cet effet est en grande partie dû à l'azote. Selon Dutordoir (2006), l'application de N, particulièrement en combinaison avec P et K, stimule le tallage et la fertilité des talles pour le mil. Ainsi, si l'un de ces deux éléments devient limitant, l'efficacité de la fertilisation azotée chute fortement (Lacharme, 2001). De plus l'application des fortes doses d'engrais minéraux permet de satisfaire les besoins des plantes pour un bon développement des talles. En effet, les fortes doses d'engrais permettent non seulement de corriger la carence du sol en N, P et K mais également de favoriser un bon développement des talles. Ceci suggère que le nombre de talles par plant est donc proportionnel au type d'engrais et/ou à la dose reçue. Des résultats similaires ont été obtenus par Gala et *al.* (2011) qui ont montré que le nombre de talles évolue avec l'augmentation de la dose d'engrais. Ainsi donc le nombre de talles est aussi influencé par la dose reçue par plant.

3.2.1.3. Effets de la densité de semis et de la fertilisation sur le pourcentage de talles fructifères

La densité de semis n'a pas d'effet sur le pourcentage de talles fructifères. Ceci peut être attribué à la régularité de la pluie (46 jours de pluie bien répartis pour 1335 mm) durant toute la saison. Il est en effet connu que le pourcentage de talles fructifères, n'est influencé par la densité de semis qu'en situation de déficit hydrique (Azam-ali et *al.*, 1984 ; Eldin, 1990).

Un faible pourcentage de talles fructifères est noté au niveau du témoin surtout au niveau de la densité élevée. Cela montre qu'avec l'augmentation de la densité de semis, le sol n'a pas pu satisfaire les besoins des plants. Cette diminution des nutriments dans le sol est accentuée par la compétition entre les plants du mil. Par contre la fumure minérale et/ou organique a eu une

répercussion importante sur le pourcentage de talles fructifères qui augmente avec le niveau des engrais. D'après Diouf (1990), le pourcentage de talles fructifères serait également lié aux conditions de nutrition azotée et hydrique. Ces résultats traduisent la nécessité de fertiliser pour améliorer le pourcentage de talles fertiles.

3.2.1.4. Effets de la densité de semis et de la fertilisation sur la teneur en chlorophylle

Les résultats montrent un effet fortement significatif des différentes formules d'engrais azotés sur la teneur en chlorophylle. En effet, les teneurs les plus élevées sont notées avec les formules d'engrais qui ont bénéficié d'une quantité importante en azote. Celles-ci sont donc proportionnelles à la quantité d'azote apportée aux plants du mil. La fertilisation azotée est un élément important pour la teneur en chlorophylle des plants du mil. Ces résultats sont en accord avec l'étude de Schepers et *al.* (1992), qui établit que les teneurs en chlorophylle augmentent en fonction de la dose d'azote.

3.2.2. Effets de la densité de semis et de la fertilisation sur la biomasse sèche et sur le rendement grain

3.2.2.1. Effets de la densité de semis et de la fertilisation sur la biomasse sèche

La densité de semis n'a pas influencé le rendement en biomasse sèche. Cela peut être expliqué par le fait que la densité de semis n'a pas d'effet sur la quantité de lumière reçue par les plants du mil. Les études de Norman et Arkebauer (1991), ont montré que la production de la biomasse chez les cultures est en fonction de la quantité de rayonnement absorbé par le couvert végétal et de l'efficacité de conversion de ce rayonnement en matière sèche. Ces résultats ne sont pas en accord avec ceux de Siene et *al.* (2010) qui établissent que les densités élevées permettent de produire les plus grandes biomasses sèches.

Un effet bénéfique des doses d'engrais est noté pour le rendement en biomasse sèche des parcelles fertilisées. Les formules d'engrais ayant les quantités d'engrais organiques les plus élevées ont donné les rendements les plus importants. Cela montre qu'avec ces doses, les plantes ne souffrent d'aucun déficit en nutriments d'où leur bonne croissance. Il est à noter aussi que les amendements organiques incorporés aux sols sous forme de fumier enrichissent la fraction légère et constituent une source d'azote et d'humus pour les plants du mil (Bado et *al.*, 1997).

3.2.2.2. Effets de la densité et de la fertilisation sur le rendement en grain du mil

L'augmentation de la densité de semis a augmenté de manière significative les rendements en grain du mil. Ces résultats sont en accord avec ceux de Payne (1997) et de Bagayogo (2012)

qui ont également montré l'augmentation du rendement avec l'accroissement de la densité de la population. Lorsque la densité des plants augmente les rendements par plant diminuent, tandis que ceux par unité de surface augmentent (Derogar et Mojjadam, 2014). Par contre, De Rouw (2004) a montré qu'une densité de semis élevée n'est pas vraiment nécessaire pour obtenir un rendement élevé dans le Sahel.

Les rendements faibles notés au niveau du témoin et des formules d'engrais minéraux simples prouvent que seule l'action combinée des trois éléments (N, P et K) permet une amélioration des rendements du mil. En effet, Les engrais minéraux composés permettent aux plantes de satisfaire leurs besoins en ces éléments. En outre, les éléments nutritifs libérés par ces engrais sont directement utilisables par les plantes. Une augmentation linéaire des rendements en grain est notée avec l'augmentation de la quantité d'azote apportée dans les engrais minéraux composés. Ces résultats sont en phase avec ceux de Diouf (2001), qui montrent qu'en condition d'alimentation hydrique optimale, le rendement grain augmente avec la fertilisation azotée. En effet, l'azote influence l'augmentation des panicules et la stimulation du tallage. D'après Vidal (1963), l'absorption de l'azote conditionne la croissance du mil tout au long de son cycle végétatif et influence positivement le rendement en grain. Cependant il est à noter que Ganry *et al.* (1974) ont obtenu le même rendement (3 t ha^{-1}) à Bambey avec seulement 120 kg ha^{-1} d'urée. En effet, par rapport à la zone Sud, la pluviométrie est faible à Bambey. De ce fait, on note un faible lessivage des éléments nutritifs surtout l'azote. Une augmentation du rendement en grain est notée avec l'évolution croissante des doses d'engrais organiques. Cela peut être attribué au rôle essentiel de la matière organique dans le recyclage des éléments nutritifs et la régulation de la nutrition des plantes. En effet, une bonne minéralisation de la matière organique permet la disponibilité des macroéléments indispensables au bon développement des plants. Des études sur la courbe de réponse du mil ont montré que des doses croissantes de fumier de 1 à 3 t/ha pourraient apporter des surplus de rendement de 20 à 100 % par rapport à un témoin sans fertilisation (Ganry et Sarr, 1975 ; Badiane, 1987).

3.2.2.3. Effets de la densité de semis et de la fertilisation sur le Poids de Mille Grains (PMG)

La densité de semis n'a pas influé le PMG du mil. Ceci suggère que la densité élevée n'a pas entraîné une compétition entre les plantes pour l'eau, la lumière et surtout pour les éléments nutritifs qui s'avèrent nécessaires au bon remplissage des grains. D'après Thibault (2001), lorsque les ressources vitales sont limitées, la concurrence entre les plants influence le PMG de

chaque plant. Les études de Gate et *al.* (1992), ont montré aussi que le PMG dépend des conditions d'alimentation en eau durant la phase de remplissage et de formation du grain.

Les différentes formules d'engrais minérales ou organiques ont révélé une différence significative du PMG suivant les différentes doses. Ces résultats montrent que les engrais minéraux ou organiques ont un avantage en ce sens qu'ils permettent un meilleur remplissage des grains. Ceci est peut-être dû à un meilleur enrichissement du sol en éléments nutritifs (N, P et K) par les apports d'engrais dont le rôle important dans le remplissage des grains a été mis en évidence par les expérimentations de Téné (2013). D'où l'effet important des engrais dans l'amélioration du poids des grains de mil. D'après Eldin (1990), le PMG est particulièrement sensible à l'apport des engrais.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Les rendements de la culture du mil en milieu paysan sont très faibles. L'objectif de cette présente étude était de contribuer à l'amélioration durable de la productivité du mil Sanio à Kolda. Les résultats obtenus ont montré une variation considérable des rendements en fonction des différentes formules d'engrais. La comparaison des densités de semis a permis de montrer qu'une forte densité de semis permet d'augmenter le rendement en grain du mil. Cependant, au niveau de la biomasse sèche les densités de semis élevées n'ont pas influencé le rendement. Quelle que soit la densité de semis considérée, les doses importantes d'engrais minéraux composés ou organiques ont entraîné une augmentation importante du rendement en grain et en biomasse du mil. Au terme de cette étude, pour la forte densité de semis (0,9 m x 0,45 m), la formule d'engrais T20 (324 kg Urée + 270 kg DSP + 55 kg KCL) avec un rendement 4 fois supérieur à celui obtenu en milieu paysan (0,8 kg/ha) est la meilleure formule d'engrais à recommander pour le rendement en grain du mil. Pour la faible densité (0,9 m x 0,9 m), les formules d'engrais à recommander avec un rendement en grain 2,5 fois supérieur à celui obtenu en milieu paysan sont la T23 (7,5 t/ha MO) et la T19 (174 kg Urée + 108 kg DSP + 40 kg KCL). Vu la place importante qu'occupe la culture du mil en milieu paysan, les résultats de cette étude contribueront à faire face au problème vivrier. Cependant, pour une meilleure productivité durable du mil Sanio, il serait nécessaire de prendre en compte ces perspectives :

- ✓ faire une analyse de l'efficacité économique des formules de fertilisation pour analyser leur rentabilité ;
- ✓ évaluer d'autres doses d'engrais encore plus élevées pour déterminer le rendement plafond ;
- ✓ adapter les formules utilisées en station expérimentale au milieu paysan afin d'en tirer des résultats définitifs nécessaires à la validation des recommandations de fertilisation ;
- ✓ conduire l'étude dans d'autres zones agro-écologiques du pays pour pouvoir spécifier les formules d'engrais selon les caractéristiques climatiques de chaque zone de culture.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. **Ahmadi N., Chantereau J., Hekimian Lethève C., Marchand J.L. et Ouendeba B., 2002.** Les céréales dans Mémento de l'Agronome CIRAD-GRET 2002. Ministère des Affaires étrangères. Pages 777-830.
2. **Amadou B., 2009.** Identification of marker-trait associations for resistance to *Striga hermonthica* (Del.) Benth. Segregating in a wild x cultivated pearl millet [*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.] mapping population of F3 progenies. Thèse de maîtrise, Spécialisation Systèmes et Techniques Innovants pour un Développement Agricole Durable (STIDAD). Montpellier-SupAgro, Montpellier.
3. **ANSD., 2012.** Présentation de la région de Kolda. Rapport annuel. www.ansd.sn (09/07/2018).
4. **Azam-Ali S.N., Gregory P.J. et Monteith J.L., 1984.** Effects of planting density on water use and productivity of pearl millet (*Pennisetum typhoides*) grown on stored water. I. Growth of roots and shoots. II. Water use, light interception and dry matter production. *Expl. Agric.*, 20: 203-214, 215-224.
5. **Bado B.V., Sedogo M.P., Cescas M.P., Lompo F. et Bationo A., 1997.** Effet à long terme des fumures sur le sol et les rendements du maïs au Burkina Faso. *Cahiers Agricultures*. Vol. 6 (6) : 571-575.
6. **Bado., 2002.** Rôle des légumineuses sur la fertilité des sols ferrugineux tropicaux des zones guinéennes et soudaniennes du Burkina Faso. Thèse présentée à la Faculté des études supérieures de l'Université Laval, Département des sols et de génie agroalimentaire.
7. **Badiane A.N., 1987.** Courbe de réponse à des doses croissantes de fumier (Thilmakha) et Essais Travail du sol (Sole III Nord, Bambe). ISRA-CNRA de Bambe.
8. **Bagayogo M., 2012.** Effects of plant density, organic matter and nitrogen rates on rice yields in the system of rice intensification (sri) in the "office du Niger" in Mali. *ARPN Journal of Agricultural and Biological Science* 7 (8): 620-632.
9. **Badiane M., 1999.** Gestion intégrée des ennemis du mil dans des champs paysans à Bambe : test de méthodes de contrôle de mildiou, du *striga* et de la mineuse de l'Epi, avec l'approche IPM/M. Mémoire d'ingénieur agronome. Spécialité : Production végétale. ENSA/Thies.85p.

10. **Bationo A. et Vlek P.L.G., 1997.** The role of nitrogen fertilizers applied to food crops in the Sudano-sahelian zone of West Africa. In *Soil Fertility Management in West African Land Use Systems* (éd. Renard G., Neef A., Becker K., von Oppen M.). Margraf Verlag, Weikersheim, Ch. 4, p. 41-51.
11. **Bationo A. et Ntare B.R., 2000.** Rotation and nitrogen fertilizer effects on pearl millet, cowpea and groundnut yield and soil chemical properties in a sandy soil in the semiarid tropics, West Africa. *Journal of Agricultural Science*, 134, p. 277-284.
12. **Bationo A. et Buerkert A., 2001.** Soil organic carbon management for sustainable land use in Sudano-Sahelian West Africa. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 61, 131- 142.
13. **Berger M., Belem P.C., Dakouo D. et Hien V., 1987.** Le maintien de la fertilité des sols dans l'Ouest du Burkina Faso et la nécessité de l'association agriculture-élevage. *Cot. et Fib. Trop.*; vol.XLII Fasc 3. 10p.
14. **Bidinger F. R. et Raju D. S., 2000.** Mechanisms of adjustment by different pearl millet plant type to varying plant population densities. *Journal of Agricultural Science*, 134, 181-189.
15. **Campbell C.A., Bowren K.E., Schnitzer M., Zentner R.P. et Townley-Smith L., 1991.** Effect of crop rotations and fertilization on soil organic matter and some biochemical properties of a thick Black Chernozem. *Can. J. Soil Sci.* 71: 377-387.
16. **Christianson C.B., Bationo A. et Baethgen W.E., 1990.** The effect of soil tillage and fertilizer use of pearl millet yields in Niger. *Plant Soil* 123, 51-58.
17. **Clément J.C., 1984.** Les mils pénicillaires de l'Afrique de l'Ouest. Prospections et collectes, Abidjan/Rome, ORSTOM-IBPGR.
18. **CMA/AOC., 2004.** Note technique de la filière Mil/Sorgho dans la zone CMA/AOC.15p.
19. **Dancette C., 1978.** Besoins en eau et adaptation du mil à la saison des pluies au Sénégal, in : *Proc. Agroclimatological Res. Needs of the semi-arid tropics.* ICRISAT. 211-226.
20. **Dancette C., 1983.** Estimation des besoins en eau des principales cultures pluviales en zone soudano-sahélienne. *Agron. Trop.* 38 (4), 281-294.
21. **De Rouw A., 1998.** Gestion de la fertilité du sol sur un terroir sahélien Fumure animale, matière organique et encroûtement superficiel du sol dans les systèmes de culture de mil, étude au Niger. Programme Fed 1994-1999 amélioration et gestion de la jachère en Afrique de l'Ouest. *Agriculture et développement* N°18-Juin, 63-70.

22. **De Rouw A., 2004.** Improving yields and reducing risks in pearl millet farming in the African Sahel. *Agricultural Systems*, 81, 73-93.
23. **Denis J., 1984.** Manuel des Principales Cultures Sahélienne, Tome 1. Publications Agrhymet, 173, Niamey.
24. **Derogar N. et Mojaddam M., 2014.** Effect of plant density on grain yield and yield components in faba bean. *International journal of plant, animal and environmental science*.
25. **Diouf O., 2001.** Réponses agro-physiologiques du mil (*Pennisetum glaucum* (L.) R. BR.) à la sécheresse : influence de la nutrition azotée. Thèse de Doctorat, Université Libre de Bruxelles.
26. **Diouf M., 1990.** Analyse de l'élaboration du rendement du mil (*Pennisetum typhoides* Stapf et Hubb.). Mise au point d'une méthode de diagnostique en parcelles paysannes. INA Paris Grignon. 227 p.
27. **Dugué P. et Gigou J., 2002.** La gestion de la fertilité. Dans Memento de l'Agronome CIRAD-GRET 2002. Ministère des Affaires étrangères. Pages 601-641.
28. **Dutordoir D.C., 2006.** Impact de pratiques de gestion de la fertilité sur les rendements en mil dans le Fakara (Niger). Travail de fin d'études présenté en vue de l'obtention du grade de bio-ingénieur. Faculté d'ingénierie biologique, agronomique et environnementale. Université Catholique de Louvain. 214p.
29. **Dwyer L.M., Anderson A.M., Ma B.L., Stewart D.W., Tollenaar M. et Gregorich E., 1994.** Quantifying the nonlinearity in chlorophyll meter response to corn leaf nitrogen concentration. *Can. J. Plant Sci.* 75: 179-182.
30. **Epstein E., 1972.** Mineral nutrition of plants: Principles and perspectives. John Wiley, New York.
31. **Eldin., 1990.** Croissance et développement du mil (*pennisetum typhoides*) sous deux conditions de fumure minérale, ISTOM. 53p.
32. **FNIE., 1979.** La fertilisation. 4eme trimestre. Paris.78p.
33. **FAO., 1997.** Le sorgho et les mils dans la nutrition humaine – ROME. 35-166.
34. **Gala B.T.J., Camara M., Yao-Kouamen A. et Keli Z.J., 2011.** Rentabilité des engrais minéraux en riziculture pluviale de plateau : Cas de la zone de Gagnoa dans le centre ouest de la Côte d'Ivoire. *Journal of Applied Biosciences* 46: 3153-3162
35. **Ganry F., Bideau J. et Nicou R., 1974.** Action de la fertilisation azotée et de l'amendement organique sur le rendement et la valeur nutritionnelle du mil Souna III. *Agron. Trop.* 29(10), 1006-1015.

- 36. Ganry F. et Sarr L., 1975.** Valorisation du recyclage organique dans un objectif d'économie des engrais et de maintien de la fertilité des sols au Sénégal. Acquis et perspectives. ISRA-CNRA de Bambey. Doc mult, 18p.
- 37. Gate P., Bouthier A. et Monier J.L., 1992.** La tolérance à la sécheresse, une réalité à valoriser. *Persp. Agric.*, 169: 62-67.
- 38. Gowda C.L.L. et Rai K.N., 2006.** Evolution of hybrid parents research. Dans Hybrid parents research at ICRISAT. Sous la direction de (C.L.L.Gowda, K.N. Rai, B.V.S. Freddy et K.B. Sana). ICRISAT Center, Patancheru. p1-10.
- 39. Hafner H., Bley J., Bationo A., Martin P. et Marschner H., 1993.** Long-term nitrogen balance for pearl millet (*Pennisetum glaucum*) in an acid sandy soil of Niger. *Journal of Plant Nutrition*, 156, 169-176.
- 40. Havard M., 1986.** Le semis du mil au Super-Eco en culture attelée. *Machinisme agricole tropical*, 93: 15-20.
- 41. Humble G.D et Raschke K., 1971.** Stomatal Opening Quantitatively Related to Potassium Transport. *Plant Physiol.* (1971) 48, 447-453.
- 42. Illiassou Y., 2009.** Evaluation de l'application périodique de l'urine hygiénisée sur la culture du mil (*Pennisetum glaucum*). Mémoire de fin d'étude pour l'obtention du diplôme d'Ingénieurs des Techniques Agricoles (ITA). Option : Productions Végétales. Faculté d'agronomie/UAM, Niamey.39p.
- 43. Jacquinot L., 1970.** Résultats et perspectives des recherches effectuées au Sénégal sur la potentialité du mil céréalière (*P. typhoides*). *L'agronomie tropicale*, 25: 1088-1095.
- 44. Kane A., 2015.** Effet de la fertilisation sur le développement, le rendement du riz (*oryza sativa* L). Mémoire d'ingénieur des travaux agricoles, ISFAR ex-ENCR, Université Thiès, Bambey, Sénégal.
- 45. Kéita C., 1985.** Fumures minérales et organiques. Mémoires d'ingénieur du Développement Rural. Option : Agronomie. IDR/UO. Burkina Faso. 90p.
- 46. Lacharme M., 2001.** La fertilisation minérale du riz « Fascicule 6 ». 19p.
- 47. Loumerem M., 2004.** Etude de la variabilité des populations de mil (*Pennisetum glaucum* (L.) cultivées dans les régions arides tunisiennes et sélection de variétés plus performantes. PhD, Université de Gent, Faculté d'agronomie de Gent.
- 48. Maiti R.K. et Bidinger F.R., 1981.** Growth and Development of the Pearl Millet Plant. Research Bulletin N° 6. ICRISAT Patancheru P.O., Andhra Pradesh 502324, India: 14p.
- 49. Masse D., Hien V., Bilgo A., Diatta M., Manlay R.J. et Chotte J-L., 2005.** Matières organiques et activités biologiques dans les sols tropicaux des cycles Culture-Jachère.

Séminaire International « Territoires et aridité au Nord et au Sud du Sahara » La lutte contre la dégradation des terres, bilan des acquis et nouvelles perspectives de recherches. Tunis, 13 juin 2005.

- 50. Mbaye D.F., 1993.** Contraintes phytosanitaires du mil (*Pennisetum glaucum* L.) dans le sahel: Etat des connaissances et perspectives, ISRA/CNRA de Bambey, Sénégal.
- 51. Moulia B., Loup C., Chartier M., Allirand J.M. et Edelin C., 1999.** Dynamics of architectural development of isolated plants of maize (*Zea mays* L.) in a non-limiting environment: the branching potential of modern maize. *Annals of Botany* 84: 645-656.
- 52. Moumouni K.H., 2014.** Construction d'une carte génétique pour le mil, *Pennisetum glaucum* (L.) R. Br., par une approche de génotype par séquençage (GBS). Mémoire de Maîtrise en biologie végétale. Université Laval, Québec, Canada, 93 p
- 53. Muehlig-Versen B., Buerkert A., Bationo A. et Marschner H., 1997.** Crop residue and phosphorus management in millet based cropping systems on sandy soils of the Sahel. In *Soil Fertility Management in West African Land Use Systems* (éd. Renard G., Neef A., Becker K., von Oppen M.). Margraf Verlag, Weikersheim, Ch. 3, p. 31-42.
- 54. N'Dayegamiye A., Goulet M. et Laverdière M.R., 1997.** Effet à long terme d'apports d'engrais minéraux et de fumier sur les teneurs en C et en N des fractions densimétriques et des agrégats du loam limoneux Le Bras. *Can. J. Soil. Sci.* 77 : 351-358. www.nrcresearchpress.com (14/02/18).
- 55. Norman J.M. et Arkebauer T.J., 1991.** Predicting canopy photosynthesis and light use efficiency from leaf characteristics. In *Modeling Crop Photosynthesis from Biochemistry to Canopy*, KJ Boote, RS Loomis (eds). CSSA Spec. Publ. 19. CSSA : Madison, WI; 75-94.
- 56. Payne W.A., 1997.** Managing yield and water use of pearl millet in the sahel. *Agron. J.* 89:481-490.
- 57. Pichot J., Sogodogo M.P., Poulain J.F. et Arrivets J., 1981.** Evolution de la fertilité d'un sol ferrugineux tropical sous l'influence de fumures minérales et organiques, *Agronomie tropicale* 26, 13p.
- 58. Pieri C., 1989.** Fertilité des terres de savanes. Bilan de trente ans de recherche et de développement agricoles au sud du Sahara. Ministère de la Coopération et CIRAD-IRAT, Paris. 444p.
- 59. ROCAFREMI., 2002.** Sélection et mise à la disposition des paysans de variétés et semences appropriées ; résultats du projet P1 1991-1996. 42p.
- 60. Sarr P.L., 1986.** Fertilisation minérale et organique du Mil au Sénégal. Sénégal.

- 61. Schepers J.S., Blackmer T.M. et Francis D.D., 1992.** Predicting N fertilizer needs for corn in humid régions: using chlorophyll meter. Bulletin Y-226. National Fertilizer and Environmental Research Center, Muscle Shoals, AL. p. 105-114.
- 62. Shapiro B.I. et Sanders J.H., 1997.** Fertilizer Use in Semiarid West Africa: Profitability and Supporting Policy. *Agricultural Systems*, 56 (4), 467-482.
- 63. Siband P., 1981.** Croissance nutrition et production du mil (*Pennisetum typhoides*) en zone sahélienne. *Agron. Trop.*, 38 (1) : 27-35.
- 64. Siband P., 1983.** Essai d'analyse du fonctionnement du mil (*Pennisetum typhoides*) en zone sahélienne. *Agron. Trop.* 38 (1) : 27-36
- 65. Siene L.A.C., Muller B. et Ake S., 2010.** Etude du développement et de la répartition de la biomasse chez deux variétés de mil de longueur de cycle différente sous trois densités de semis. *Journal of Applied Biosciences* 35: 2260–2278 ISSN 1997–5902.
- 66. Singh S.D., 1995.** Downy mildew of pearl millet. *Plant Disease*. 79,545-550.
- 67. Stevenson, J. F 1986.** Cycles of soil: carbon, nitrogen, phosphorus, sulfur, micronutrients. John Wiley & Sons, New York.
- 68. Téné A.P., 2013.** Détermination des options de fertilisation organo-minérale et de densité de semis pour une intensification de la production du maïs dans la Région de l'est du Burkina. Mémoire de fin d'étude, 71p.
- 69. Thomas E.D. et Miner W.H., 1996.** Fertilizing forages. Compte-rendu de la conférence présentée à Dairy Day at Miner Institute. November 1996.
- 70. Thomas B., 1998.** Photoperiodism: an overview. In : P. J. Lumdsen and A. J. Millar (Eds.), *Biological rhythms and photoperiodism in plants*. BIOS Scientific Publisher, Oxford, pp. 151-165.
- 71. Thibault K., 2001.** Impact de différentes densités de semis en fonction des propriétés du sol dans la culture du maïs-grain. Colloque maïs-soya: mieux savoir pour mieux vivre. www.agrireseau.qc.ca/grandescultures/Documents/EricThibault.pdf (03/09/2018).
- 72. Traoré S., Bagayogo M., Coulibaly B. S. et Coulibaly A., 2002.** Amélioration de la gestion de la fertilité des sols et celle des cultures dans les zones sahéliennes de l'Afrique de l'Ouest: une condition sine qua none pour l'augmentation de la productivité et de la durabilité des systèmes de culture à base de mil. Syngenta foundation for sustainable agriculture. <http://www.syngentafoundation.org> (09/03/2018).
- 73. UNIFA., 2005.** Raisonnement de la fertilisation. Parlons fertilisation. Paris. 5p
- 74. Vidal P., 1963.** Croissance et nutrition minérale des mils (*Pennisetum*) cultivés au Sénégal. Thèse de doctorat. Faculté des Sciences, Université de Dakar.

- 75. Wilson J.P., Hess D.E. et Hanna W.W., 2000.** Resistance to *Striga hermonthica* in wild accessions of the primary gene pool of *Pennisetum glaucum*. *Phytopathology* 90: 1169-1172.
- 76. Zeinabou H., Mahamane S., Bismarck N.H., Bado B.V., Lompo F. et Bationo A., 2014.** Effet de la combinaison des fumures organo-minérales et de la rotation niébé-mil sur la nutrition azotée et les rendements du mil au sahel. *Int. J. Biol. Chem. Sci.* 8 (4): 1620-1632.
- 77. Zingore P.S., Wairegi L. et Ndiaye M.K., 2014.** Guide pour la gestion des systèmes de culture de riz. Consortium Africain pour la Santé des Sols, Nairobi.