

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)

Effet de différents niveaux de fertilisation sur les propriétés chimiques du sol et sur les performances agronomiques du mil (*Thialack 2*) [*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br] en station en Moyenne Casamance.

Présenté et soutenu par :

Cheikh Amath Tidiane SOW

Encadrants : Dr Ismaïla COLY, Maître de Conférences UFR-ST / UASZ

Dr Abdoulaye BADIANE, Chargé de Recherches (CRA, Djibélor/ISRA)

Soutenu publiquement le 23 juin 2023 devant le jury composé de :

Présidente: Mme Siré DIEDHIOU Maître de Conférences UFR-ST / UASZ

Membres: M. Djibril SARR Maître Assistant UFR-ST / UASZ

M. Joseph Saturnin DIEME Maître Assistant UFR-ST / UASZ

M. Baboucar BAMBA Chargé de Recherches ISRA/CRA Djibélor

M. Abdoulaye BADIANE Chargé de Recherches ISRA/CRA Djibélor

M. Ismaïla COLY Maître de Conférences UFR-ST / UASZ

Année universitaire 2021-2022

DEDICACES

Je dédie ce mémoire à:

- mes très chers parents pour leur amour, leur confiance, leurs conseils, leurs prières et leur soutien inconditionnel;
- mes tuteurs DJIBA ;
- mon oncle paternel feu EL Hadji Ousmane SOW ;
- mon frère Dr Amadou SOW ;
- tous mes frères et sœurs en témoignage mon affection fraternelle, ma reconnaissance et ma profonde tendresse ;
- tous mes amis et amies ;
- la onzième promotion du Master d'Agroforesterie.

REMERCIEMENTS

En cette occasion solennelle, je voudrais avant tout commencer par rendre grâce à Dieu de m'avoir donné la santé qui m'a permis de suivre et terminer cette formation mais aussi de réaliser ce travail dans de très bonnes conditions.

Je souhaiterais dans l'espérance de n'omettre personne, adresser mes sincères remerciements à tous ceux qui ont de près ou de loin contribué à ce travail.

Ainsi j'adresse, mes sincères remerciements à mes encadrants Dr Abdoulaye BADIANE et Pr Ismaïla COLY pour avoir accepté de diriger ce travail. Qu'ils trouvent ici, l'expression de ma profonde reconnaissance, de mon respect et mon immense gratitude pour toute la confiance, les efforts consentis, leurs encouragements pour l'aboutissement de ce travail.

J'exprime ma profonde gratitude à l'endroit du Dr Baboucar BAMBBA, chercheur à l'ISRA /CRA de Djibélor pour son assistance et sa disponibilité.

Je remercie du fond du cœur tous nos enseignant-chercheurs du département d'Agroforesterie, à leur endroit, je citerai le fameux serment de Galien : « *Honorer ceux qui m'ont instruit dans les préceptes de mon art et leur témoigner ma reconnaissance en essayant de rester fidèle à leur enseignement* ». Il s'agit de : Dr Djibril SARR chef du département, Pr Ngor NDOUR, Pr Siré DIEDHIOU, Pr Mohamed Mahmoud CHARAHABIL, Dr Antoine SAMBOU, Dr Boubacar CAMARA, Dr Joseph Saturnin DIEME, Dr Aly DIALLO, Dr Abdoulaye SOUMARE, Dr Saboury NDIAYE, Dr Oulimata DIATTA, pour toutes les connaissances acquises à travers leur formation pédagogique.

Je remercie aussi tous les Docteurs du département d'Agroforesterie particulièrement Dr Arfang O. K. GOUDIABY et Dr Seydou NDIAYE pour leur accompagnement durant notre formation.

Mes sincères remerciements au Dr Momar Talla SECK, Directeur général de l'ISRA ainsi que tout le personnel de l'institut. Je remercie également le Centre International pour le Développement des Engrais (IFDC) et le projet «DUNDAL SUUF » pour l'accompagnement et le financement pour la réalisation de ce travail dans de bonnes conditions.

Mes remerciements vont aussi à l'endroit de l'ensemble des doctorants du département d'Agroforesterie et nos camarades de la onzième promotion. Je remercie ma famille SOW pour la confiance qu'elle m'a accordée, son encadrement et le soutien inconditionnel.

Je ne terminerai pas sans remercier Raphael SENGHOR pour son appui matériel durant tout mon stage à Séfa ainsi que tous mes collègues stagiaires à l'ISRA/CRA de Djibélor pour leur collaboration et leur travail d'équipe.

TABLE DES MATIERES

DEDICACES	i
REMERCIEMENTS	iii
LISTE DES TABLEAUX.....	v
LISTE DES FIGURES.....	vi
LISTE DES SIGLES ET ACRONYMES	vii
RESUME.....	viii
ABSTRACT.....	ix
INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE.....	3
I.1 Généralités sur le sol.....	4
I.1.1 Propriétés physiques du sol.....	4
I.1.1.1 La texture.....	4
I.1.1.2 La structure.....	4
I.1.1.3 La porosité.....	5
I.1.1.4 La densité apparente.....	5
I.1.2 Propriétés chimiques du sol.....	6
I.1.3 Propriétés biologiques du sol.....	6
I.2 Fertilité et fertilisation.....	6
I.2.1 Notion de fertilité des sols.....	6
I.2.2 La fertilisation.....	7
I.2.2.1 La fertilisation minérale.....	7
I.2.2.2 La fertilisation organique.....	7
I.2.2.3 La fertilisation organo-minérale.....	8
I.3 Généralités sur le mil.....	9
I.3.1 Origines et taxonomie.....	9
I.3.2 Morphologie, croissance et développement du mil.....	9
I.3.2.1 Morphologie du mil.....	9
I.3.2.2 Croissance et développement du mil.....	11
I.3.3 Exigences écologiques du mil.....	13
I.3.4 Les techniques culturales du mil.....	13
I.3.5 Les contraintes à la production du mil.....	14
I.3.5.1 Les contraintes abiotiques.....	14
I.3.5.2 Les contraintes biotiques.....	15
CHAPITRE II ATERIEL ET METHODES.....	16

II.1	Présentation de la zone d'étude	17
II.2	Matériel végétal utilisé	18
II.3	Fertilisants utilisés	18
II.4	Dispositif expérimental.....	19
II.5	Conduite de l'essai.....	20
II.6	Collecte des données	21
II.6.1	Prélèvement d'échantillons de sols	21
II.6.2	Détermination des paramètres chimiques du sol.....	22
II.6.3	Mesures des paramètres agro morphologiques	23
II.7	Traitement et analyse des données	25
CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSION		27
III.1	Résultats.....	28
III.1.1	Effet des traitements sur quelques paramètres chimiques du sol.....	28
III.1.2	Effet des traitements sur les paramètres agro morphologiques du mil	30
III.1.2.1	Nombre de feuilles produites par plant.....	30
III.1.2.2	Hauteur des plants du mil	31
III.1.2.3	Tallage du mil	32
III.1.2.4	Densité des plants de mil	33
III.1.2.5	Diamètre au collet et longueur de la tige des plants du mil.....	35
III.1.2.6	Diamètre et longueur des épis des plants du mil.....	35
III.1.2.7	Rendement et ses composantes.....	36
III.1.2.8	Biomasse paille (tige + feuilles) et biomasse aérienne totale du mil.....	37
III.1.2.9	Taux d'accroissement (TA) en grains de mil.....	38
III.1.3	Relation entre les paramètres étudiés et les traitements appliqués.....	38
III.2	Discussion.....	40
CONCLUSION ET PERSPECTIVES		44
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES		45

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: effet des traitements sur quelques paramètres chimiques du sol	29
Tableau 2: variation du nombre de feuilles produites par plant de mil en fonction des traitements suivant les dates de mesure.....	31
Tableau 3: variation de la hauteur des plants de mil en fonction des traitements et des dates de mesure.....	32
Tableau 4: variation de la densité des plants de mil en fonction des traitements suivant les dates de mesure	34
Tableau 5 : variation du diamètre (mm) et la longueur de la tige (cm) des plants des mil sounas en fonction des traitements.....	35
Tableau 6 : variation du diamètre (mm) et de la longueur de l'épi (cm) du mil en fonction des traitements	36
Tableau 7 : variation du rendement et ses composantes en fonction des traitements.....	37
Tableau 8 : variation de la biomasse paille (tige et feuilles) et de la biomasse aérienne totale du mil suivant les traitements.....	37

LISTE DES FIGURES

Figure 1: classes des couleurs des grains du mil (Hausmann, 2007).....	10
Figure 2: phases de la croissance et du développement du mil (Maiti et Bidinger 1981).....	12
Figure 3 : carte de localisation de la zone d'étude.....	17
Figure 4 : variation interannuelle de la pluviométrie de la région de Sédhiou pour la série 1991-2020 (ANACIM, 2022).....	18
Figure 5 : illustration de l'apport d'urée(A) et d'engrais organique (B). Crédit photo : Sow (2022) ..	19
Figure 6 : dispositif expérimental en bloc de Fisher randomisés	20
Figure 7: parcelle désherbée manuellement. Crédit photo : Sow (2022)	21
Figure 8 : prélèvement des échantillons de sol en composite. Crédit photo : Sow (2022).....	21
Figure 9 : biomasse aérienne (tige et feuilles) (A), pesage de la biomasse aérienne (B).Crédit photo : Sow, (2022)	24
Figure 10 : pesage des épis. Crédit photo : Sow (2022).....	24
Figure 11 : variation du nombre de feuilles par plant en fonction des traitements	30
Figure 12: variation de la hauteur des plants de mil en fonction des traitements.....	31
Figure 13 : variation du nombre de talles des plants de mil suivant les traitements	33
Figure 14 : variation de la densité des plants de mil suivant les traitements.....	34
Figure 15: Taux d'accroissement en grains des traitements par rapport au témoin vulgarisé	38
Figure 16 : relation entre les traitements testés et les variables étudiées	39

LISTE DES SIGLES ET ACRONYMES

ANACIM : Agence Nationale de l'Aviation Civile et de la Météorologie

ACP : Analyse en Composantes Principales

ANOVA : Analyse de la Variance

ANSD : Agence Nationale de la Statistique et de la Démographie

CE : Conductivité Electrique

CRA : Centre de Recherches Agricoles

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

DC : Diamètre au Collet

DE : Diamètre Epi

FAO : Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture

FMR : Fertilisation Minérale Recommandée

H : Hauteur

IFDC : Centre International de développement des Engrais

IR : Indice de Récolte

ISRA : Institut Sénégalais de Recherches Agricoles

JAS : Jours Après Semis

MO : Matière Organique

NE : Nombre d'Epis

NF : Nombre de Feuilles

NPK : Azote, Phosphore, Potassium

NT : Nombre de talles

PDC : Plan de développement Communal

pH : Potentiel Hydrogène

PMG : Poids Mille Grains

RBA : Rendement Biomasse Aérienne

RE : Rendement en Epis

RP : Rendement en Paille

TA : Taux d'Accroissement

UASZ : Université Assane Seck de Ziguinchor

RESUME

Au Sénégal, les écarts entre les rendements moyens enregistrés et les rendements potentiels des variétés améliorées de mil résultent en partie de la baisse de fertilités des sols et de l'utilisation d'engrais de qualité non spécifique à la spéculation pratiquée. Les formules et les doses d'engrais utilisées n'ont pas été actualisées depuis des décennies et ne tiennent pas compte de l'hétérogénéité des sols et des conditions d'exploitation. L'objectif du travail est de contribuer à l'amélioration de la productivité du mil souna (*Thialack 2*) en Moyenne Casamance. Pour ce faire, une expérimentation a été conduite en station à Séfa à l'aide d'un dispositif en blocs complets randomisés. Elle comprenait un facteur à savoir le type de fertilisation à quatre (4) modalités. Il s'agit du T0 (0kg Compost/ha, 0 kg NPK ; 0 kg Urée ; T1 (150 kg/ha de 15-10-10 en engrais de fond+ 100 kg/ha Urée (46-0-0) ; T2 (150 kg/ha de 12-33-19 en engrais de fond+ 100 kg/ha Urée (46-0-0) et T3 (5t/ha de compost en fond +150 kg/ha de 12-33-19 en engrais de fond+ 100 kg/ha Urée (46-0-0)). Les résultats ont montré que le traitement T3 a un effet positif tant sur les paramètres de croissance que sur les paramètres de production à l'exception du rendement en grains et le poids des 1000 grains. Par ailleurs, l'ajout du compost à la nouvelle formule d'engrais minéral a permis des gains additionnels en paille. Concernant les propriétés chimiques du sol, les traitements n'ont induit aucun effet significatif sur le pH, le taux d'azote ainsi que le rapport C/N mais cet effet est significatif sur la conductivité électrique, les teneurs en carbone et en matière organique et le Phosphore assimilable. La plus forte quantité de P assimilable a été observée avec la nouvelle formule (12-33-19) seule et avec la nouvelle formule associée au compost avec des valeurs respectives de $3,29 \pm 0,96$ et $5,08 \pm 0,48$ ppm. Quant à la MO, les pourcentages obtenus sont inférieurs à 2% pour l'ensemble des traitements. Cette étude devrait être reconduite en deuxième année pour confirmer ou infirmer les résultats obtenus en première année d'expérimentation.

Mots clés : compost, fertilisation minérale, mil souna, Moyenne Casamance.

ABSTRACT

In Senegal, the discrepancies between the average yields recorded and the potential yields of improved millet varieties are partly due to lower soil fertility and the use of quality fertilizers that are not specific to the crop. The fertilizer formulas and doses used have not been updated for decades, and do not take into account the heterogeneity of soils and farming conditions. The aim of the work is to contribute to improving the productivity of souna millet (Thialack 2) in Moyenne Casamance. To this end, an experiment was carried out at the Séfa station using a randomized complete block design. It included one factor, namely the type of fertilization, with four (4) modalities. These were T0 (0kg Compost/ha, 0 kg NPK; 0 kg Urea; T1 (150 kg/ha of 15-10-10 bottom dressing+ 100 kg/ha Urea (46-0-0); T2 (150 kg/ha of 12-33-19 bottom dressing+ 100 kg/ha Urea (46-0-0) and T3 (5t/ha compost bottom dressing +150 kg/ha of 12-33-19 bottom dressing+ 100 kg/ha Urea (46-0-0)). Results showed that T3 treatment had a positive effect on both growth and production parameters, with the exception of grain yield and 1000-grain weight. Moreover, the addition of compost to the new mineral fertilizer formula resulted in additional gains in straw. In terms of soil chemical properties, the treatments had no significant effect on pH, nitrogen content or C/N ratio, but they did have a significant effect on electrical conductivity, carbon and organic matter content, and assimilable phosphorus. The highest amount of assimilable P was observed with the new formula (12-33-19) alone and with the new formula combined with compost, with values of 3.29 ± 0.96 and 5.08 ± 0.48 ppm respectively. As for OM, the percentages obtained were below 2% for all treatments. This study should be repeated in the second year to confirm or invalidate the results obtained in the first year of experimentation.

Key words: compost, mineral fertilization, souna millet, Moyenne Casamance.

INTRODUCTION

En fonction du volume de la production et des surfaces cultivées, le mil se classe au septième rang mondial et regroupe un ensemble de céréales qui ont pour caractéristique commune la petitesse de leurs grains (FAO, 1997). Sa culture occupe 11,5 millions d'hectares en Afrique et 1,7 millions d'hectares en Inde (Siene et *al.*, 2010). Selon Moumouni (2014), l'Afrique contribue à 40 % de la production mondiale de mil. Il est cultivé sur plus de 60 % des terres arables (Sy et *al.*, 2015). Au Sénégal, sa production est estimée à 1 039 860 tonnes en juillet 2022 dont 113 501 tonnes pour la Moyenne Casamance (ANSD, 2022). Le mil est la seconde céréale la plus consommée au Sénégal (28% en zone rurale et 19% en zone urbaine) après le riz (59% en zone rurale et 77% en zone urbaine). La consommation moyenne est de 30 kg/tête/an au niveau national (USAID, 2017). Plus de 80% de la production mondiale proviennent de l'Afrique et de l'Inde (FAO, 2015). En Afrique de l'Ouest, le Sénégal occupe la cinquième place derrière le Niger, le Nigéria, le Mali, le Burkina Faso (Kanfany, 2017). Deux types de variétés de mil sont essentiellement cultivés au Sénégal : le mil souna ou type hâtif (généralement non photopériodique) qui est presque cultivé sur tout le territoire national, et le type tardif ou mil sanio (généralement photopériodique) qui est essentiellement cultivé en Casamance et au Sénégal Oriental (ISRA et *al.*, 2005).

Les grains de mil riches en protéines, fibres et fer sont consommés après transformation de la farine sous forme de bouillies, de galettes, de pain ou de couscous. Les sous-produits des graines sont utilisés dans l'alimentation des animaux et les tiges dans la confection des habitats en milieu rural (Bamba, 2020). Le mil est la 7ème céréale la plus importante au monde. (Kadri et *al.*, 2019)

Malgré, l'importance de cette culture, les rendements (0,75 t. ha⁻¹) restent très faibles en milieu paysan (Ndiaye et Sawane, 2015 ; DAPSA, 2016). En Casamance, la faiblesse de ces rendements en grain est essentiellement due à la combinaison de facteurs abiotique (déficit pluviométrique, pauvreté des sols, matériel local rustique et peu productif), biotique (insectes ravageurs, maladies, adventices) et à l'inadéquation des pratiques culturales (Kouakou et *al.*, 2013). Pour améliorer cette situation, la productivité agricole doit passer par une augmentation de la fertilité des sols plutôt que par l'extension des superficies cultivées au détriment des forêts et des terres marginales. Pourtant, l'intérêt d'associer la fumure organique aux engrais minéraux, en vue d'augmenter le niveau de fertilité des sols et le rendement des cultures a été largement démontré par Akanza et Yao, (2011) ;Akanza et *al.* (2016); Somda et *al.* (2017) et Zenabou et *al.*, (2014). Au Sénégal, les écarts entre les rendements moyens enregistrés et les

rendements potentiels des variétés améliorées de mil résultent en partie de la baisse de fertilité des sols et à l'utilisation d'engrais de qualité non spécifique à la spéculation pratiquée. Les formules et les doses d'engrais utilisées n'ont pas été actualisées depuis des décennies et ne tiennent pas compte de l'hétérogénéité des sols et des conditions d'exploitation.

De ce fait, la restauration de la fertilité des sols par apport de matière organique et de fertilisant minéral apparaît comme une nécessité impérieuse. Ce qui permettrait d'augmenter la stabilité structurale du sol, de diminuer le risque d'érosion, d'améliorer la qualité de la production et d'augmenter les rendements agricoles.

C'est dans cette optique que cette étude a été initiée en vue de contribuer à l'amélioration de la productivité du mil (*Thialack 2*) en Moyenne Casamance. De manière spécifique, il s'agit d'évaluer les performances agronomiques d'une nouvelle formule d'engrais chimique sur la croissance et le rendement du mil et sur les propriétés chimiques des sols en station.

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

CHAPITRE I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1 Généralités sur le sol

Le sol provient de l'altération des roches par l'action de l'atmosphère, de la biosphère et du climat. Il constitue la partie superficielle meuble de la croûte terrestre. Le sol est un milieu extrêmement complexe et très hétérogène (Badiane, 2014). C'est un milieu vivant qui renferme une grande diversité et est le support de l'activité humaine. Le sol produit, contient, accumule, tous les éléments nécessaires à la vie (azote, phosphore, calcium, potassium, fer, oligoéléments...), y compris l'air et l'eau. Dans le sol, on retrouve une phase solide formée d'éléments minéraux et organiques, une phase liquide formée d'eau et de substances dissoutes et une phase gazeuse (Gelin et Stengel, 1998, Manga, 2019). Selon Locatelli (2013), le sol possède des propriétés physiques caractérisées par sa texture et sa structure.

I.1.1 Propriétés physiques du sol

Les propriétés physiques du sol sont liées à sa texture, sa structure, sa porosité, son aération ainsi que sa densité apparente. Ces propriétés physiques sont souvent influencées par la nature des matériaux qui composent le sol et des propriétés biologiques liées à la présence de très nombreux micro-organismes mais aussi d'organismes végétaux (racines des plantes, micro-algues) et animaux (micro et mésofaune).

I.1.1.1 La texture

La texture ou la granulométrie fait référence à la répartition des sédiments en fonction de leur taille. C'est une propriété fixe du sol qui est de loin la propriété la plus importante. La texture a une influence dominante sur les propriétés physiques et chimiques des sols. La texture du sol est à la base de toutes les autres propriétés, c'est la propriété du sol qui traduit de manière globale la composition granulométrique de la terre fine (Gobat *et al.*, 2010). Les éléments constitutifs intervenant dans la définition de la texture d'un sol sont les sables (50-2000 μm), les limons (2-50 μm) et les argiles (< 2 μm) (Gobat *et al.*, 1998).

I.1.1.2 La structure

La structure du sol fait référence à l'organisation des sédiments définis par la texture. Elle fait aussi référence à la continuité des pores, leur capacité à retenir et transférer les fluides et les substances organiques et inorganiques, et sert de support à la croissance et au développement des racines (Emerson, 1959 ; Lal *et al.*, 1991). Deux (2) catégories de structures sont reconnues. Il s'agit des structures continues (sans agrégats) et ceux fragmentaires (avec agrégats). Ces deux classifications contiennent chacune plusieurs sous classes. La structure grumeleuse (avec agrégats) reste la mieux conseillée en agriculture (Tamia *et al.*, 1999). La structure peut être un

indicateur de l'état de santé d'un sol (Six *et al.*, 2000). La structure du sol influence les vitesses de germination des graines, le drainage des sols. Cela nous donne donc des indications sur les propriétés du sol au moment de l'observation. En effet, la structure d'un sol n'est pas figée et peut évoluer plus ou moins rapidement avec le travail mécanique, les facteurs climatiques (gel/dégel) et biologiques (exploration des racines, actions d'organismes vivants, etc.).(Baize *et al.*, 2013)

I.1.1.3 La porosité

La porosité fait référence au volume des vides présents dans le sol et disponible pour l'air, l'eau, les racines, etc. Elle peut être d'origine biologique (vers de terre, racines, etc.), structurale (au niveau de la motte de terre) ou texturale. (Baize *et al.*, 2013). Elle dépend du mode d'arrangement des constituants solides du sol et de leur nature (Gobat *et al.* 1998). La porosité contrôle la circulation des fluides et des gaz dans le sol, le transport de solutés et exerce ainsi une influence sur l'activité biologique (Millington et Quirk, 1961).

Nous pouvons distinguer la porosité intra-agrégat et inter-agrégat. La première est évaluée en comptant le nombre et la taille des pores/cm². L'utilisation d'une loupe sur le terrain est fortement conseillée! La seconde prend en compte les vides générés par la structure, l'activité biologique, etc. La porosité globale d'un horizon est estimée en combinant ces deux sources d'information, mais reste très subjective.

I.1.1.4 La densité apparente

La densité apparente (D_a) du sol est un paramètre important pour la description de la qualité du sol et de ses fonctions écologiques. Elle est une des variables la plus importante dans les études portant sur la structure du sol et est en effet, liée à la nature et à l'organisation des constituants du sol (Chauvel, 1977). Elle permet, en outre, de calculer la porosité et d'apprécier ainsi indirectement la perméabilité, la résistance à la pénétration des racines (Maertens, 1964), la cohésion des horizons (Yoro, 1983 ; Yoro et Assa, 1986) et la réserve en eau du sol (Henin *et al.*, 1969).

Elle est généralement faible ($=1.3\text{kg/dm}^3$) dans «les sols à structure grumeleuse stable» comme le chernozem (Du Chaufour, 1970). Les horizons humifères des sols tropicaux, relativement structurés (De Boissezon, 1965) se caractérisent par des densités apparentes plus faibles que celles des horizons minéraux sous-jacents à structure massive (Kouakou, 1981 ; Yoro, 1983).

I.1.2 Propriétés chimiques du sol

Les propriétés chimiques du sol correspondent aux teneurs et disponibilités des éléments minéraux nutritifs pour les plantes (Frisque, 2007). Ces éléments interagissent entre eux par le biais du pouvoir adsorbant, du complexe argilo-humique et du pH qui interviennent dans la nutrition des plantes (Mustin, 1987). Les ions présents dans les sols proviennent essentiellement des processus de dégradation de la roche mère et de minéralisation de la matière organique. Ils peuvent également être introduits par l'intermédiaire de fertilisants chimiques et d'amendements organiques (Locatelli, 2013). Le pouvoir adsorbant est la propriété des colloïdes minéraux (argiles) et organiques (composés humiques) de fixer les cations grâce à leurs charges électro négatives.

I.1.3 Propriétés biologiques du sol

Les organismes du sol sont responsables, directement ou indirectement, de nombreuses fonctions du sol. Celles-ci incluent la décomposition des résidus animaux et végétaux avec libération des éléments nutritifs assimilables pour la plante, la transformation et le stockage des nutriments, les échanges gazeux et hydriques, la formation et la stabilisation de la structure du sol et la synthèse des composés humiques (Dick, 1997 ; Paul, 2000). La faune et la microflore contribuent à la fertilité biologique à travers l'aération du sol, la fixation de l'azote moléculaire par les bactéries fixatrices (*Rhizobium*), la solubilisation des minéraux insolubles (phosphates) par les champignons (mycorhizes). Les activités microbiennes influencent considérablement la fertilité chimique et physique du sol (Millogo, 2002).

I.2 Fertilité et fertilisation

I.2.1 Notion de fertilité des sols

La fertilité d'un sol fait classiquement référence à une aptitude à produire de la biomasse végétale (en quantité et en qualité) et à fournir des récoltes sous des conditions extrinsèques aux sols supposés favorables (Thomas, 2006). La fertilité d'un sol est déterminée en fonction de différents facteurs physiques (profondeur, perméabilité, aération, compacité), chimiques (acidité, capacité d'échanges, disponibilité en éléments nutritifs, carences et toxicités) et biologiques (Lacharme, 2001). Donc la fertilité du sol désigne l'aptitude du sol à assurer de façon soutenue et durable la croissance des plantes et l'obtention de récoltes. Elle résulte de la combinaison de ses composantes physico-chimiques et biologiques qui déterminent l'approvisionnement des plantes en éléments nutritifs (Abga, 2013). Le sol, en tant que support de cette production, est souvent considéré comme une boîte noire dans laquelle on introduit des

engrais et des amendements et dont on extrait des produits. Selon Merelle (1998), la fertilité englobe fondamentalement trois types de composantes interdépendantes :

- ✓ La fertilité physique détermine les conditions de germination des semences, de colonisation efficace des racines, d'aération et d'économie en eau.
- ✓ La fertilité chimique a trait à la nutrition minérale des végétaux via les concepts de biodisponibilité des éléments, de carences, de toxicités et d'équilibres,
- ✓ La fertilité biologique est liée à l'activité biologique dont dépendent les transferts des nutriments du sol à la plante et la minéralisation des matières organiques apportées.

I.2.2 La 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. La fertilisation des cultures est principalement basée sur les engrais minéraux au détriment des amendements organiques, qui sont pourtant indispensables pour la protection du complexe argilo-humique sur lequel repose le maintien de la fertilité des sols (Koulibaly et *al.*, 2015). La fertilisation inclut d'une part les engrais dont la fonction principale est d'apporter les éléments nutritifs aux plantes et d'autre part les amendements destinés à améliorer les propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols (Schvartz et *al.*, 2005). Une fertilisation équilibrée améliore également la résistance des cultures aux maladies, aux ravageurs et à la concurrence avec les mauvaises herbes (Ndiaye, 2018).

I.2.2.1 La fertilisation minérale

La fertilisation minérale est considérée souvent comme l'apport d'éléments majeurs de fertilisants (l'azote, le phosphore et le potassium) au sol pour fournir aux végétaux des éléments minéraux plus ou moins rapidement disponibles (Leclerc, 2009). Nous pouvons distinguer 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.

I.2.2.2 La 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 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). Par ailleurs, les composts sont riches en éléments nutritifs et les recherches récentes ont démontré que des apports de ces produits augmentent les niveaux de matière organique dans le sol, la capacité d'échange cationique, la biomasse de microorganismes et leurs activités (Kitabala et *al.*, 2016). Ainsi, le compost permet d'améliorer la fertilité des sols et favorise également la nutrition minérale des cultures grâce aux éléments minéraux qu'il contient (Culot et Lebeau, 1999 ; Francou, 2003).

I.2.2.3 La 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 (Sénégal) 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). L'association de la fumure organique et de l'engrais minéral génère alors des synergies : les apports minéraux favorisent les cultures ce qui produit ainsi plus de biomasse, dont une partie est recyclée au sein de la parcelle via les résidus de récolte ; l'apport de ressources organiques (fumier ou compost) peut à son tour, améliorer l'efficacité des engrais minéraux (Anonyme, 2014). Toutefois, l'interaction entre le fumier organique et l'engrais minéral est absente à la première année d'application. Les modes de fertilisation organo-minérale et

organique apparaissent comme meilleurs conservateurs du potentiel de production et occasionnent une dégradation moins accentuée des sols (Dembélé, 1994).

I.3 Généralités sur le mil

I.3.1 Origines et taxonomie

Le nom commun mil désigne, au sens large, plusieurs espèces de graminées dont, entre autres, *Pennisetum glaucum*, *Eleusine coracana*, *Panicum miliaceum*, *Setaria italica*, *Echinochloa crusgalli* (Saïdou, 2011). En simplifiant la taxonomie du mil, Brunken (1977) a regroupé l'ensemble des mils pénicillaires en une seule espèce polymorphique *P. typhoideum* (L.) Rich avec trois sous-espèces correspondant au mil cultivé (*Pennisetum glaucum* subsp. *glaucum*), au mil sauvage (*P. glaucum* subsp. *monodii*) et aux formes intermédiaires (*P. glaucum* subsp. *sternostachyum*).

Le mil pédicillaire ou mil à chandelles (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.) est une graminée céréalière annuelle qui se retrouve sous plusieurs noms scientifiques synonymes (kumar, 1989; Kumar et Andrews, 1993). Ces synonymes de *P. glaucum* sont : *P. typhoides* (Burm.) Stapf et Hubb., *P. typhoidum* Rich., *P. spicatum* (L.) Koem, *P. amjkanum* (L.) Leeke. L'origine du mil est incertaine, certains auteurs lui donnent comme berceau l'Afrique Centrale Occidentale, d'autres, en raison de l'importance prise par la culture en Asie lui préfèrent l'Inde (Eldin, 1990). Le mil serait originaire d'Afrique de l'ouest où l'on rencontre les diverses formes, cultivées et sauvages (Tostain et Marchais, 1993).

I.3.2 Morphologie, croissance et développement du mil

I.3.2.1 Morphologie du mil

Le mil est une plante à port érigé, possédant des tiges épaisses et à hauteurs variant de 1,5 à 3 m, mais on peut trouver des mils de près de 4 mètres (Moumouni, 2014). L'appareil racinaire est de type fasciculé avec une seule racine séminale principale suivie de nombreuses racines adventives. Une des causes de la bonne adaptation du mil aux conditions pédoclimatiques de la zone semi-aride est son développement racinaire important, pouvant atteindre 300 cm de profondeur à la récolte (Ahmadi et al., 2002 ; Rocafremi, 2002). Les tiges du mil sont dressées et rigides avec des entre-nœuds pleins (Bouzou, 2009). Les entre-nœuds de la base s'allongent en dernier et sont plus courts. Les nœuds de la base sont capables de donner des talles secondaires et tertiaires. Les nombres de talles productives varient de 1 à 7 (Anonyme, 2004). Le mil émet parfois des ramifications sur les nœuds supérieurs de la tige et donnent des panicules de petites dimensions (Illiassou, 2009). Les feuilles alternes et à nervures parallèles s'insèrent au niveau des nœuds. Elles sont formées d'une gaine entourant complètement la tige

et d'un limbe lancéolé (Anonyme, 2004). Ses feuilles sont longues, glabres, assez minces, lisses ou poilues et mesurent jusqu'à 1 m de long. L'inflorescence est une panicule apicale raide, compacte des formes cylindrique et conique. Elle a généralement 2 à 3 cm de diamètre mais peut atteindre jusqu'à 18 cm de diamètre et 15 à 45 cm de longueur. Cependant, certains cultivars locaux (Zongo du Niger) peuvent atteindre 150 cm (Anonyme, 2004 ; Moumouni, 2014 ; Hamadou, 2015). Dans la description du mil, nous trouvons 9 formes de panicule (IBPGR & ICRISAT, 1993). La panicule est constituée par un rachis (axe central), droit, cylindrique, dur et épais de 8 à 9 mm. Il s'étend sur toute la longueur de l'inflorescence. Il est recouvert de poils doux et courts. Sur ce rachis sont implantés, par l'intermédiaire des pédicelles, les involucre formés par un bouquet de soies contenant les épillets (Loumerem, 2004). Chaque panicule peut former 870 à 3000 épillets avec une moyenne de 1600 épillets. Il y a plusieurs types d'épillets: uniflores, biflores, triflores et jusqu'à six fleurs. Chaque épillet est constitué de deux (2) glumes dont une glume inférieure courte, plus large que longue, et une glume supérieure plus longue qui atteint environ la moitié de la longueur de l'épillet. La glume supérieure a une forme ovale et montre 3 à 4 nervures. Certaines des fleurs d'épillet sont fertiles et forment des caryopses (Moumouni, 2014 ; Hamadou et *al.*, 2017). Les fruits sont des caryopses enveloppés dans des glumes et glumelles. Les graines sont de 3 à 5 mm de long, obovale à globuleuses (IBPGR & ICRISAT, 1993). Leur couleur varie du gris cendre à légèrement bleue. Certaines variétés sont de couleur brun-grise, brun-jaune et même noire (Figure 1).



Figure 1: classes des couleurs des grains du mil (Hausmann, 2007)

I.3.2.2 Croissance et développement du mil

Le cycle de croissance du mil peut être subdivisé en trois phases : végétative, reproductive et maturation des grains.

I.3.2.2.1 Phase végétative

La phase végétative a une durée de 30 à 50 jours, allant de l'émergence à la formation de la panicule. Elle commence par la germination de la graine et l'apparition des jeunes plantes, le tallage et continue jusqu'à l'initiation de la panicule (Maiti et Bidinger, 1981). La germination est hypogée, c'est-à-dire qu'elle se fait entièrement sous terre. La graine germe au bout de 24 heures dans les bonnes conditions et la levée s'achève au bout de 2 à 5 jours après le semi (JAS). La racine apparaît la première ensuite les tiges et les feuilles. Environ 8 JAS, la racine ou la racine principale disparaît et est remplacée par des racines secondaires ou adventives (Adam, 2003). Le tallage, émission des tiges secondaires à partir des tiges primaires, débute 15 jours après la levée et se poursuit pendant 10 à 20 jours. A ce stade, l'accumulation de biomasse concerne essentiellement les feuilles et les racines (Anonyme, 2004). L'élongation de la tige se produit par l'élongation séquentielle des entre-nœuds en commençant à la base : c'est la montaison. Les talles suivent les mêmes phases que la tige principale mais avec un léger retard (Loumerem, 2004). L'accumulation de la biomasse concerne la tige en plus des racines et des feuilles (Anonyme, 2004). L'initiation de la panicule est marquée par la transformation du bourgeon végétatif apical en bourgeon floral, synonyme du début de la phase suivante.

I.3.2.2.2 Phase de reproduction

Elle commence avec l'initiation de la panicule de la tige principale entre 22 et 30 jours après l'émergence (Anonyme, 2004). Cette phase comprend l'épiaison, la floraison et la fructification. Elle est marquée par le développement total des feuilles et par la sénescence des feuilles à la base de la tige principale et a une durée de 18 à 25 jours suivant les variétés (Loumerem, 2004). Durant la montaison, la feuille paniculaire se renfle au niveau de la gaine 6 à 10 jours avant l'émergence de la panicule (= épi). Cette dernière subit une série de changements : différenciation des épillets, des glumes, des stigmates des fleurs et des anthères. Dès l'émergence de l'épi (épiaison), les parties femelles des fleurs s'épanouissent les premières par l'exposition des stigmates bifides blanchâtres. Les anthères ne s'épanouissent que trois à cinq jours après émergence de l'épi : c'est la floraison (Anonyme, 2004 ; Loumerem, 2004). En général, ce sont les pollens des anthères épanouies sur d'autres épis qui fécondent les ovaires de ceux qui émergent à la faveur du vent, des insectes ou autre source de pollinisation. La fécondation conduit à l'œuf qui donne la graine : c'est la fructification ou nouaison. Au terme

de sa croissance, l'épi constitue une masse allongée à l'intérieur de la feuille paniculaire au sommet de la tige.

I.3.2.2.3 Phase de maturation

La maturation est le développement progressif du caryopse ou fruit du sommet vers la base de l'épi (Moumouni, 2014). Cette phase débute avec la fécondation des fleurs de la panicule principale et continue jusqu'à la maturité de toute la plante (tige principale et talles), (Loumerem, 2004). Les grains atteignent leurs maturités en général 22 à 30 jours après la fécondation suivant la variété. L'accumulation de biomasse se produit surtout dans les caryopses mais peut continuer dans d'autres parties car les talles sont en retard du développement (Anonyme, 2004). Il s'agit d'une phase d'élaboration de substances de réserves (amidon, protéines), la migration de celles-ci vers l'albumen du grain et parallèlement la formation de l'embryon (Loumerem, 2004). En passant par 3 stades (laiteux, cireux et vitreux), les grains arrivent à la maturité physiologique 20 à 50 jours après la floraison selon les variétés (Dutordoir, 2006). Du stade laiteux à la maturité complète, les grains ont des caractéristiques différentes (Moumouni, 2014) :

Au stade laiteux : le grain est brun verdâtre et laiteux.

Au stade cireux ou pâteux : le grain atteint son aspect presque définitif, son contenu est pâteux.

A la maturité complète : le grain est dur, à ce niveau on ne peut le casser avec l'ongle. On constate une déshydratation naturelle maximum. A ce stade, le grain prend sa couleur et sa taille définitive.

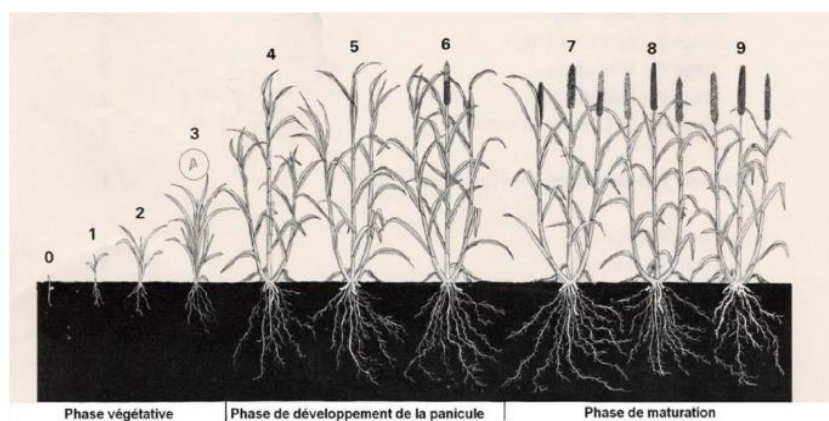


Figure 2: phases de la croissance et du développement du mil (Maiti et Bidinger 1981)

Stades : 0= levée ; 1= 3 feuilles ; 2= 5 feuilles ; 3=initiation florale ; 4= apparition dernière feuille ; 5= gonflement ; 6= 50% floraison ; 7= grain laiteux ; 8= grain pâteux ; 9= maturité physiologique

I.3.3 Exigences écologiques du mil

Les mils pénicillaires sont des graminées de zones semi-arides chaudes aux températures moyennes de 28 °C pendant la saison de culture qui dure trois à six mois (Ahmadi *et al.*, 2002). Les températures les plus favorables pour le mil se situent entre 27 et 30 °C. Le mil est une plante à jour court quoiqu'il existe des variétés indifférentes à la longueur du jour. Une journée de 12 heures et une température de 28 à 30 °C conviennent à la croissance de la culture (Upadhyaya *et al.*, 2008). Le mil exige pour son développement une somme de température de 2050 à 2550 °C. Ses températures de germination sont : 10 à 12 °C (minimum), 37 à 44 °C (optimum) et 44 à 50 °C (maximum), (Loumrem, 2004). Il a une photosensibilité faible et est décrite comme sensible au mildiou mais résistante à l'ergot et la verse. Le mil, moins exigeant que le sorgho, est généralement cultivé sur des sols légers et sablo-argileux bien drainés avec un pH faible. Il tolère la sécheresse et un faible niveau de fertilité des sols (Ahmadi *et al.*, 2002). La pluviométrie annuelle optimale de 350 à 500 mm bien répartie sur 75 jours au minimum, peut assurer une récolte du mil satisfaisante (Upadhyaya *et al.*, 2008). Selon la précocité de la variété, Moumouni (2014) a fait la répartition suivante : de 600 à 1000 mm de pluies, nous trouvons surtout les mils tardifs et de 350 à 600 mm, nous trouvons des mils hâtifs. Des conditions de précipitation et d'humidité relative faibles sont souhaitables lors du mûrissement et de la maturation des graines (Upadhyaya *et al.*, 2008). La culture est généralement pratiquée sans irrigation sur des sols pauvres en matière organique. Dans ces conditions de culture extensive, les rendements sont bas (moins de 1 tonne/ha). En effet, les zones semi-arides où le mil est fréquemment cultivé présentent une variation importante du point de vue pluviométrique.

I.3.4 Les techniques culturales du mil

Les effets des techniques culturales telles que le travail du sol combiné avec les amendements organiques et les fertilisations minérales ont été étudiés par plusieurs auteurs (Charreau et Nicou, 1971; Ganry *et al.*, 1974; Cissé, 1986; Wey *et al.*, 1987). Ces pratiques culturales contribuent, entre autres, à l'optimisation de l'utilisation des ressources hydriques limitées dans les zones sèches. Ainsi, un travail du sol de 10 à 15 cm augmente significativement les rendements du mil, en améliorant l'enracinement du mil, la capacité d'extraction de l'eau et des éléments minéraux (Charreau et Nicou, 1971; Cissé, 1986). Ganry *et al.*, (1974) ont obtenu un rendement de l'ordre de 3 t ha⁻¹ avec 120 kg/ha d'urée fractionnés en trois apports (semis, démarriage et montaison). Sur un sol Dior Ganry *et al.*, (1974) ont aussi constaté un effet positif de l'enfouissement de pailles compostées sur le nombre d'épis et le rendement. Cissé (1986) et Cissé et Vachaud (1988) ont montré dans une rotation mil/arachide que les effets de

l'incorporation de matière organique (10 tonnes de fumier ha⁻¹) se manifestent par un accroissement des stocks d'azote, une réduction de l'acidité du sol et une amélioration de l'enracinement. Par conséquent, une meilleure alimentation hydrique et minérale des plantes est observée avec des rendements plus importants. Par contre, les effets de la matière organique sur les caractéristiques de rétention et/ou de transfert hydrique du sol sont fonction, entre autres facteurs, de la texture (taux d'argile, de limon fin et grossier) et de la structure (Cissé, 1986). Selon Jatnison (1958) cité par Cissé (1986), la relation entre la teneur en matière organique et la capacité de rétention n'existe que si le taux d'argile est supérieur à 13%.

Le mil est habituellement semé en poquets avec 8 à 10 grains par poquet enfouis superficiellement entre 1 et 2 cm (Bamba, 2020). Les poquets de semis sont distants de 80 à 100 cm sur la ligne et l'écartement interlignes est compris entre 80 et 90 cm (Diouf, 1990). Les travaux d'entretien sont principalement constitués d'opérations de sarclo-binage et de démariage essentiels pour lutter contre les adventis (Ndiaye et *al.*, 2005). Le démariage de 3 à 7 plantes par poquet, est pratiqué 7 à 10 jours après la levée (Diouf, 1990). Il est précédé d'un premier sarclage qui assure la destruction des adventices et l'ameublissement du sol en surface.

I.3.5 Les contraintes à la production du mil

De nombreuses contraintes pèsent sur la production agricole des céréales et du mil en particulier. Celles-ci sont à la base de la baisse du rendement du mil observée en milieu paysan. L'ensemble de ces contraintes peuvent être regroupées en deux catégories : abiotiques et biotiques.

I.3.5.1 Les contraintes abiotiques

La réduction du rendement du mil est causée non seulement par un bilan hydrique déficitaire mais aussi par la baisse progressive de la fertilité des sols, la mise en culture des terres marginales, l'absence de jachère (Ba et *al.*, 2014 ; Zakari et *al.*, 2016). En effet, les zones semi-arides où le mil est fréquemment cultivé présentent des variations pluviométriques importantes. Les pluies 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).

I.3.5.2 Les contraintes biotiques

En dehors des contraintes abiotiques, la pression parasitaire est l'une des principales contraintes à l'élévation de la production du mil. En effet, le mil est attaqué par des ravageurs et ennemis de tous ordres : des maladies, des insectes, des adventices, des oiseaux...

➤ **Maladies:**

Des pertes importantes de rendement sont causées par diverses sources de maladies (virus, champignons, bactéries, nématodes et autres) dont les plus importantes sont les maladies fongiques. Parmi elles figurent le mildiou, le charbon et l'ergot.

Mildiou du mil : le mildiou causé par un champignon, *Sclerospora graminicola* (Sacc.) Schröet, est la maladie du mil la plus importante en Inde et en Afrique de l'Ouest (Jogaiah et al., 2008 ; Sudhakar et al., 2012). La maladie a été rapportée pour la première fois par Butler (1907). C'est une maladie hautement destructrice et répandue dans la plupart des zones de culture du mil de l'Asie et de l'Afrique (Aparna, 2003 ; Thakur et al., 2008). Le mildiou du mil peut occasionner des pertes de rendement de l'ordre de 20 à 40% (Thakur et al., 2011). Il attaque la plante dès le stade plantule par les feuilles, la tige et l'épi. La maladie se caractérise par la transformation partielle ou totale de l'épi en organes foliacés ou la mort totale de la plante. Plusieurs études ont été réalisées sur les méthodes de contrôle du mildiou du mil tant qu'en Afrique qu'en Inde. Ces études ont trait dans leurs grandes majorités sur la résistance variétale et le contrôle chimique (Thakur et al., 2003 ; Afiniki, 2005 ; Rao et al., 2005 ; Sharma et al., 2007 ; Wilson et al., 2008 ; Ati et al., 2015).

➤ **Oiseaux:**

Les attaques d'oiseaux sur les épis du mil sont fréquemment observées avec des dégâts assez élevés. Les ravages causés par les oiseaux granivores sont surtout importants dans les vallées et bassins des fleuves (fleuve Sénégal, boucle du Niger et bassin du Lac Tchad). Les espèces les plus dangereuses sont *Quelea quelea* (travailleur à bec rouge), *Q. erythrops* (travailleur à tête rouge), *Ploceus cucumillatus* (le gendarme), *Passer luteus* (moineau doré). Ces espèces sont polyphages et les pourcentages des dégâts sur le mil varient de 10 à 30% et parfois plus, surtout sur les variétés précoces qui mûrissent avant les autres (Mbaye, 1993).

Hormis les maladies et les oiseaux, il y'a les insectes nuisibles au mil comme la chenille mineuse de l'épi, *Heliocheilus albipunctella* (De Joannis), les adventices et les acridiens qui constituent également de véritables ennemis de cette culture.

CHAPITRE II ATERIEL ET METHODES

II.1 Présentation de la zone d'étude

La plaine de Séfa (12°46'58''N et 15°32'46''W), cadre géographique de la présente étude, appartient à la Commune de Diendé. Elle est polarisée par 56 villages, dont 22 dans la commune de Diendé et les 34 autres dans la commune Koussy. Le domaine agricole de Séfa est limité à l'Est par les communes de Sakar et de Karantaba, à l'Ouest par la commune de Sansamba, au Nord par la commune de Diaroumé et au Sud par la commune de Bambali (Sané, 2018).

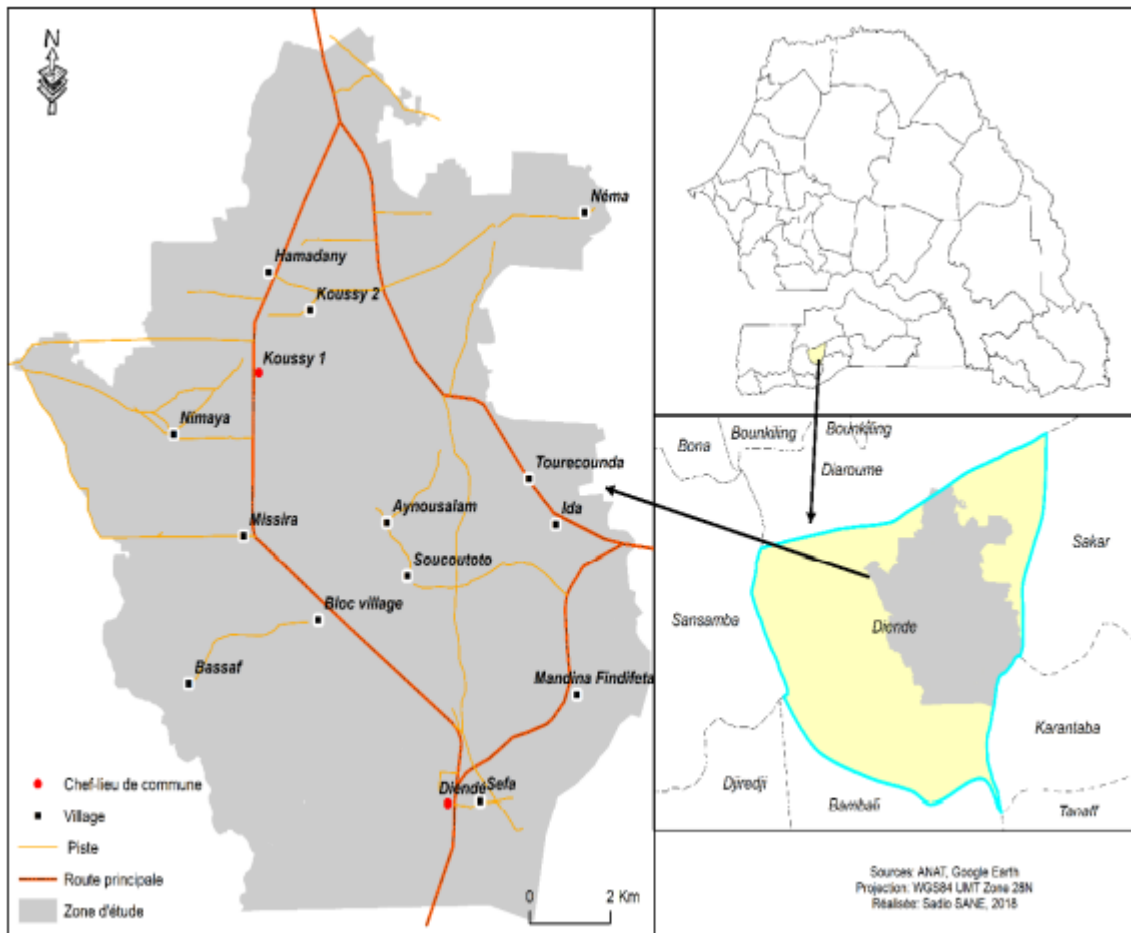


Figure 3 : carte de localisation de la zone d'étude

Le climat est de type sud-soudanien continental caractérisé par l'alternance des deux saisons : une saison pluvieuse de juin à octobre et une saison sèche de novembre à mai. Les températures sont relativement élevées allant de 25 à 33°C en saison des pluies et de 24 à 40°C en saison sèche selon le PDC de Diendé (2017) et PDC de Koussy (2018).

L'analyse de l'évolution de la pluviométrie par rapport à la normale 1991-2020 au cours de la période 1981-2020 permet de voir la variation interannuelle de la pluie à la station de Sédhiou. Le cumul pluviométrique de la région pour l'année 2022 est de 1384,4 mm. La comparaison

par rapport à la normale 1991-2020 montre une situation excédentaire à la normale sauf les années 2012 et 2020. Cette variabilité de la pluviométrie a des impacts sur les activités agricoles.

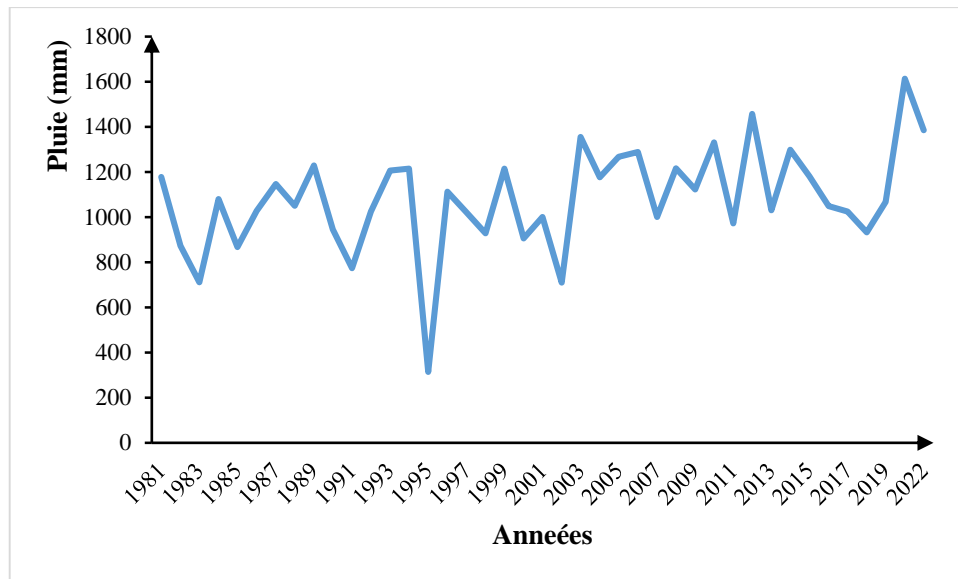


Figure 4 : variation interannuelle de la pluviométrie de la région de Sédhiou pour la série 1991-2020 (ANACIM, 2022)

La plaine de Séfa est issue des sédiments du Continental Terminal (Seck, 1956). Selon les recherches menées par l’Institut National de Pédologie (INP), délégation du Pakao en 2008, deux (02) types de sols ont été identifiés dans la plaine de Séfa à savoir : des sols beiges du groupe des sols ferrugineux tropicaux lessivés et des sols rouges du groupe des sols faiblement ferralitiques ou ferralitiques tout simplement qui sont d’aptitude élevée à moyenne pour les cultures de plateaux. Ce sont des sols à dominance sableuse (>80%), dans les premiers 20 cm du sol.

II.2 Matériel végétal utilisé

La variété utilisée au cours de l’expérience est le *Thialack 2*. Ce dernier est une variété composite obtenue en 2008 et il a été sélectionné au CNRA de Bambey. C’est une variété locale améliorée à cycle court (95 jours) dont la taille des plants peut aller jusqu’à 252 cm de hauteur. Elle a un rendement potentiel en grain de 2 à 3t/ha, sa teneur en protéine est de 14,2% et sa couleur de caryopse après battage est grise (MAER, 2012). Le *Thialack 2* fait partie des sounas.

II.3 Fertilisants utilisés

Deux types de fertilisants ont été utilisés dans le cadre de cette étude. Il s’agit :

- ✓ de l'engrais minéral 15N-10P-10K (formule vulgarisée) ; 12N-33P-19K (nouvelle formule) et de l'urée à 46N-0P-0K ;
- ✓ du compost : engrais organique



Figure 5 : illustration de l'apport d'urée(A) et d'engrais organique (B). Crédit photo : Sow (2022)

II.4 Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental (figure 6) est en blocs complets randomisés ou bloc de Fisher avec 04 répétitions ou blocs. Chaque bloc est constitué de 4 parcelles élémentaires correspondant au quatre (4) traitements soit au total 16 parcelles élémentaires. Chaque parcelle élémentaire à une superficie de 29,25 m² avec une géométrie de plantation de 0,9m×0,9m x 2 plants/poquets. Les blocs sont séparés entre eux de 1 m et la distance entre les parcelles dans un bloc est de 0,5 m. La superficie totale de l'essai est de 490,05 m² (29,7 m×18 m). Les mesures des paramètres de croissance et de production ont été effectuées sur une parcelle utile ou carré de rendement d'une dimension 2,7 m×2,7 m soit une superficie de 7,29 m².

Le facteur étudié est le type de fertilisation à quatre (4) modalités :

- T0 : Témoin absolu (0 kg compost/ha ; 0 kg/ha NPK + 0 kg/ha Urée)
- T1 : 150 kg/ha de 15-10-10 en engrais de fond+ 100 kg/ha Urée appliqué au tallage et à l'initiation paniculaire
- T2 : 150 kg/ha de 12-33-19 en engrais de fond+ 100 kg/ha Urée appliqué au tallage et à l'initiation paniculaire

- T3 : 5t/ha d'engrais organique en fond +150 kg/ha de 12-33-19 en engrais de fond+ 100 kg/ha Urée appliqué au tallage et à l'initiation paniculaire.

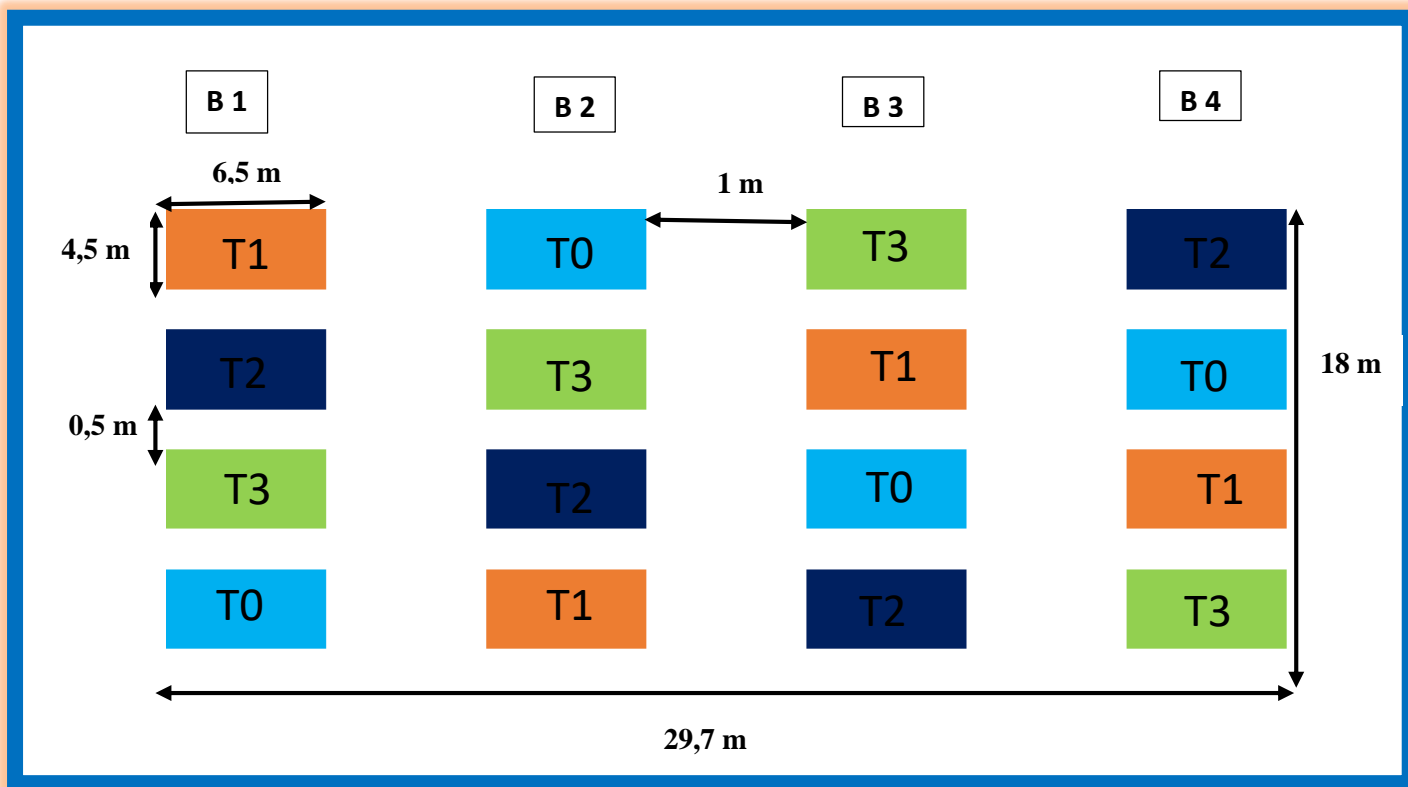


Figure 6 : dispositif expérimental en bloc de Fisher randomisés

II.5 Conduite de l'essai

Les travaux de préparation de terrain ont consisté à un labour suivi d'un nivellement de terrain quelques jours avant semis. Des piquets et des ficelles ont été utilisés afin de délimiter les différents traitements et des étiquettes afin de les identifier. Le semis a été réalisé à la main. La fertilisation minérale a été effectuée conformément aux recommandations de la recherche avec un épandage d'engrais de fonds 15-10-10 ou la formule vulgarisée et 12-33-19 ou la nouvelle formule à la dose de 150 kg/ha au semis puis un apport de 100 kg par ha d'urée (46-0-0). L'urée est apportée en deux fractions. Une première fraction est apportée au tallage avec une quantité de 50 kg/ha et la seconde à l'initiation paniculaire avec 50 kg/ha. Des désherbages manuels ont été effectués au 15^{ème} et 45^{ème} JAS pour maintenir les plants en situation de non-compétition avec les adventices.



Figure 7: parcelle désherbée manuellement. Crédit photo : Sow (2022)

II.6 Collecte des données

II.6.1 Prélèvement d'échantillons de sols

L'échantillonnage de sol (figure 8) a été réalisé dans l'horizon de sol 0-20 cm à l'aide d'une tarière. Avant semis, un échantillonnage composite a été effectué dans chaque bloc soit un total de 4 échantillons composites. Après récolte, les prélèvements ont été faits dans chaque parcelle élémentaire soit 16 échantillons au total. Chaque échantillon représente un composite de cinq prélèvements suivant un dispositif croisés d'échantillonnage.



Figure 8 : prélèvement des échantillons de sol en composite. Crédit photo : Sow (2022)

II.6.2 Détermination des paramètres chimiques du sol

Les échantillons ont été d'abord broyés puis tamisés à 2 mm avant d'être acheminés en laboratoire pour l'analyse de caractéristiques chimiques de sol qui a porté sur le pH, la conductivité électrique (CE), les teneurs en carbone (C%), en azote (N%) totaux et en phosphore assimilable (Pass).

Les pourcentages en matière organique (MO) et le rapport C/N ont été calculés en fonction des teneurs en C et N du sol. La teneur en MO total du sol s'obtient généralement en dosant la teneur en carbone, on estime que le rapport matière organique /carbone est peu près constant (Fitzpatrick ; 1983) et est égal à :

$$\text{MO (\%)/ C (\%)} = 1.72$$

- pH du sol

Les mesures de pH ont été faites sur une suspension (eau) dans un rapport sol/solution de 1g de sol/2,5 ml d'eau déminéralisée.

- Mesure de conductivité électrique (CE)

Les mesures de CE ont été faites sur une suspension (eau) dans un rapport sol/solution de 1g de sol/5 ml d'eau déminéralisée.

- Mesure de teneur en C et N

Le principe du dosage est basé sur une oxydation catalytique à l'aide d'un analyseur élémentaire (laboratoire Sol-Eau-Plante du Centre de Recherche Agricole de Saint-Louis ISRA-CRA de Saint Louis). La procédure adoptée comprend un séchage des échantillons de sol durant une nuit à l'étuve à 105°C. Il s'en suit une étape de refroidissement pendant 1h au dessiccateur. Les analyses sont effectuées à partir de l'appareil CHN (CHNSO EA 1112 Thermofinnigan Series, France). Cet appareil est équipé d'un brûleur, des nacelles en étain et d'un détecteur à conductibilité thermique. L'étain assure l'élimination de la matière organique par augmentation de la température jusqu'à 1800°C. Ce qui permet l'obtention du carbone et de l'azote. Ces deux composés passent successivement dans le catalyseur d'oxydation (900°C) et dans la colonne de réduction (750°C). Le carbone se transforme en dioxyde de carbone (CO₂) et l'azote en azote moléculaire (N₂). La séparation des deux composés est faite par chromatographie en phase gazeuse utilisant l'hélium comme gaz vecteur qui accélère l'extraction des gaz (CO₂ et N₂). Dans le chromatographe, les différents constituants gazeux sont séparés par le détecteur à

conductibilité thermique. Les résultats peuvent être exprimés en mg C/g de sol sec ou en g de C/kg de sol sec ou en encore pourcentage de % C pour le carbone total et en mg N/g de sol sec ou en g de N/kg de sol sec ou en encore pourcentage de % N pour l'azote total.

- Mesure de Phosphore assimilable (Pass)

La détermination colorimétrique du phosphore des divers extraits d'échantillons de sols est effectuée par réduction au bleu de molybdène à froid selon Murphy et Riley, 1962.

II.6.3 Mesures des paramètres agro morphologiques

Les paramètres agro morphologiques suivants ont été mesurés ou comptés :

- ❖ La hauteur des plants

La hauteur a été mesurée de la base jusqu'au sommet (habituellement 3^{ème} feuille après épi) sur 10 plants choisis aléatoirement dans un carré de rendement de 7,29 m² à l'aide d'une règle graduée.

- ❖ Le diamètre au collet

Le diamètre au collet a été déterminé sur le côté le plus large de chacun des 10 plants choisis à l'aide d'un pied à coulisse.

- ❖ Le diamètre de l'épi

Le diamètre de l'épi a été déterminé sur chacun des 10 épis choisis à l'aide d'un pied à coulisse.

- ❖ La longueur de l'épi

La longueur de l'épi a été déterminé sur chacun des 10 épis choisis à l'aide d'une règle graduée.

- ❖ Le nombre de feuilles

Le nombre de feuilles est obtenu par comptage du nombre total de feuilles sur chacun des plants retenus.

- ❖ Évaluation de la biomasse aérienne fraîche et sèche (biomasse paille)

Les tiges et feuilles de mil de chaque parcelle utile ont été récoltées puis pesées pour déterminer la biomasse fraîche (Figure 9). Après 15 jours de séchage de la biomasse fraîche (tiges et feuilles) à l'air libre, le poids sec (Biomasse sèche) a été déterminé par pesage à l'aide d'une balance de précision à 10⁻³ kg.

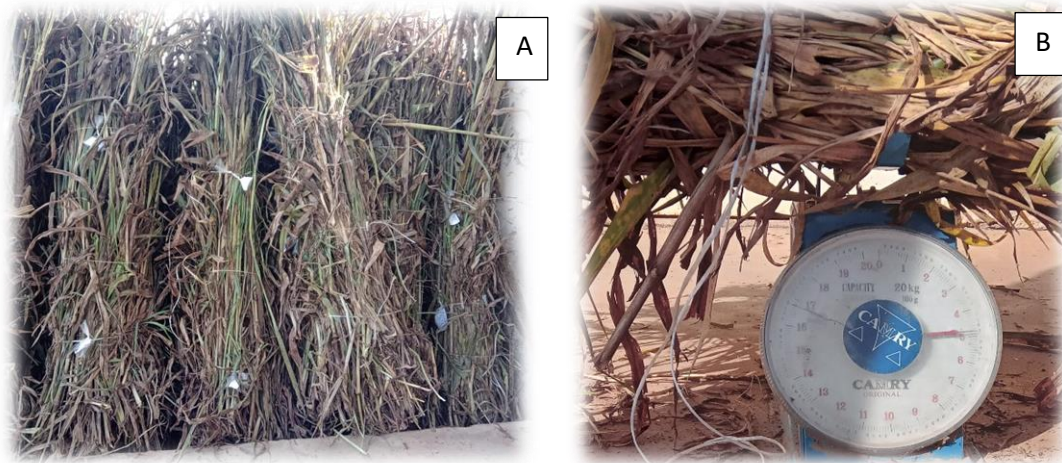


Figure 9 : biomasse aérienne (tige et feuilles) (A), pesage de la biomasse aérienne (B).Crédit photo : Sow, (2022)

❖ Évaluation de la biomasse des épis

Les épis de chaque carré utile ont été attachés en gerbe puis séchés pendant 15 jours avant d'être pesés à l'aide d'une balance de précision à 10^{-3} kg (Figure 10).



Figure 10 : pesage des épis. Crédit photo : Sow (2022)

❖ Nombre d'épis récoltés

Il a été déterminé par un comptage de tous les épis récoltés dans chaque carré utile.

II.7 Traitement et analyse des données

Les données collectées ont été traitées et analysées avec la version du logiciel RStudio 4.2.1. Les analyses de variance (ANOVA) au seuil de 95% de confiance et les tests de comparaison des moyennes de Fisher et Friedmann ou Kruskal-Wallis ont été effectuées suivant la normalité des données pour établir la significativité des différences de moyennes entre les traitements. Une Analyse en Composantes Principales a été effectuée en vue d'apprécier la relation entre les traitements testés et les paramètres étudiés. Un certain nombre de formules ont été utilisées pour le calcul de certains paramètres à savoir :

❖ Le nombre de talles par m²

Le nombre de talles a été compté au 50 JAS sur 10 plants choisis aléatoirement dans un carré de rendement de 7,29 m². Il est obtenu par le rapport du nombre total de talles par poquet sur la surface occupée par un poquet (0,81m²).

$$NT = \frac{Nt/Poquet}{Sp}$$

NT= Nombre de Talles (Talles/m²) ; Nt/Poquet= Nombre totale de talles par poquet ; Sp= Surface occupée par un poquet.

❖ Évaluation de la biomasse aérienne totale

La biomasse aérienne totale a été calculée à l'aide de la formule suivante :

$$\text{Biomasse aérienne Totale} = \text{Biomasse en paille} + \text{Biomasse des épis}$$

❖ Évaluation du rendement grains

Après récolte, battage et vannage des épis de chaque carré utile (S=7,29 m²), les grains ont été pesés après séchage. Le rendement grains a été déterminé à partir du poids sec des grains par la formule suivante :

$$R = PG * 10000 / S$$

Avec R= Rendement grains (Kg/ha) ; S= Surface carré utile (m²) ; PG= Poids moyens des grains (Kg)

❖ Évaluation du poids des mille grains

Un comptage manuel de 3 lots de 1000 grains a été effectué dans chaque parcelle élémentaire soit au total de 48 lots de 1000 grains correspondants aux parcelles utiles. Chaque lot de 1000 grains a été pesé à l'aide d'une balance de précision à 10⁻⁴ g.

❖ L'indice de récolte

L'indice de récolte (IR) a été calculé suivant la formule ci-après :

$$IR = RDG / ((RDG + RDP))$$

Avec RDG= rendement total en grains ; RDP= rendement en paille

❖ Le taux d'accroissement (TA)

Le taux d'accroissement exprimé en pourcentage et qui permet d'apprécier l'augmentation en grains des différents traitements par rapport au témoin vulgarisé (T1) a été calculé à l'aide de la formule suivante :

$$TA(\%) = (x - xi)$$

Avec x : valeur de rendement en grains du traitement concerné et xi : valeur de rendement en grains du traitement T1 (formule vulgarisée).

CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSION

III.1 Résultats

III.1.1 Effet des traitements sur quelques paramètres chimiques du sol

Le tableau 1 représente la variation de quelques paramètres chimiques du sol en fonction des traitements.

L'analyse de variance a montré qu'il n'y a aucune différence significative du pH ($Pr=0,511$), du taux d'azote ($Pr = 0,0762$) et du rapport C/N ($Pr=0,594$). Cependant, il existe une différence significative de la conductivité électrique du sol ($Pr=0,03359$) et très hautement significative de la teneur en carbone (C) ($Pr=0,000625$) et en matière organique (MO) ($Pr=0,000625$). En effet, le taux de MO au niveau des traitements à l'état final est significativement plus important que celui de l'état initial (T0i). Par contre, aucune différence significative n'a été observée entre les traitements après récolte toutefois en valeur absolue c'est le traitement T3 qui enregistre le meilleur résultat ($0,69 \pm 0,07\%$).

Pour la conductivité électrique du sol (CE), tous les traitements ont entraîné une diminution significative de celle-ci comparée à la situation avant essai (T0i). Les valeurs de conductivités les plus élevées ont été localisées au niveau des traitements T0 et T1 ($34,18 \mu s.cm^{-1}$).

S'agissant la teneur en carbone (C), tous les traitements induisent une augmentation significative de celle-ci comparée à celle de l'état avant essai T0i ($0,26 \pm 0,06$). Les traitements T1 et T3 ont enregistré les plus grands pourcentages ($0,40\%$). La même tendance a été observée pour la teneur en matière organique (MO) (tableau 1).

Concernant, le Phosphore assimilable (Pass), statistiquement on ne note pas de différence entre la situation avant essai (T0i) et à la récolte pour les traitements T3 et T2. Par contre, cet effet est significatif au niveau des traitements T0 et T1 comparé à la situation initiale (T0i). Il faut noter que la quantité de phosphore a augmenté pour le traitement T3 (tableau 1).

Tableau 1: effet des traitements sur quelques paramètres chimiques du sol

Traitements	pH eau	CE ($\mu\text{s.cm}^{-1}$)	C (%)	N (%)	C/N	MO(%)	Pass (ppm)
T0i	5,51 \pm 0,30 ^a	145,95 \pm 40,89 ^a	0,26 \pm 0,06 ^b	0,03 \pm 0,01 ^a	8,50 \pm 0,94 ^a	0,45 \pm 0,11 ^b	3,92 \pm 1,51 ab
T0	5,19 \pm 0,46 ^a	34,18 \pm 6,45 ^b	0,39 \pm 0,04 ^a	0,04 \pm 0,00 ^a	9,61 \pm 1,00 ^a	0,67 \pm 0,07 ^a	1,95 \pm 0,54 cd
T1	5,33 \pm 0,06 ^a	34,18 \pm 7,15 ^b	0,40 \pm 0,02 ^a	0,04 \pm 0,00 ^a	9,34 \pm 0,61 ^a	0,68 \pm 0,04 ^a	1,82 \pm 0,90 d
T2	4,92 \pm 0,49 ^a	29,88 \pm 1,74 ^b	0,38 \pm 0,02 ^a	0,04 \pm 0,01 ^a	9,12 \pm 1,33 ^a	0,66 \pm 0,03 ^a	3,29 \pm 0,96 bc
T3	5,25 \pm 0,84 ^a	33,68 \pm 4,49 ^b	0,40 \pm 0,04 ^a	0,04 \pm 0,00 ^a	9,03 \pm 0,84 ^a	0,69 \pm 0,07 ^a	5,08 \pm 0,48 a
Moyenne	5,24 \pm 0,49	55,57 \pm 49,34	0,37 \pm 0,07	0,04 \pm 0,01	9,12 \pm 0,94	0,63 \pm 0,11	3,21 \pm 1,51
Probabilité	0,511 ^{ns}	0,03359 *	0,000625 ***	0,0762 ^{ns}	0,594 ^{ns}	0,000625 ***	0,00098 ***

Sur une même colonne, les valeurs accompagnées de lettres identiques ne sont pas significativement différentes.

** : significatif ; ** : hautement significatif ; *** : très hautement significatif ; NS : non significatif*

III.1.2 Effet des traitements sur les paramètres agro morphologiques du mil

III.1.2.1 Nombre de feuilles produites par plant

Les résultats ont montré que statiquement les traitements ont un effet très hautement significatif sur le nombre de feuilles produites par plant ($P\text{-value} = 1.317 \times 10^{-09} ***$). Les traitements T2 (12-33-19 ou la nouvelle formule) et T1 (15-10-10 ou la formule vulgarisée) ont eu statistiquement des productions foliaires similaires. Les traitements T3 (12-33-19 + compost) et T2 (12-33-19 (nouvelle formule) ont donné les plus grandes productions foliaires moyennes avec 41,41 et 35,04 feuilles/plant respectivement. La plus faible production foliaire a été obtenue avec le témoin absolu (26,90 feuilles/plant).

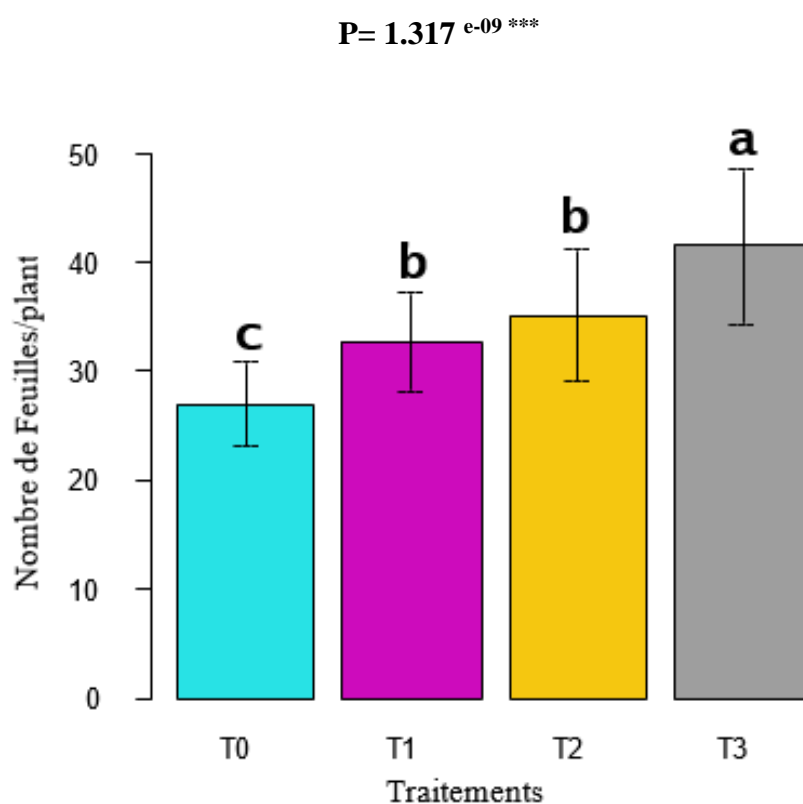


Figure 11 : variation du nombre de feuilles par plant en fonction des traitements

Considérant la production foliaire en fonction des traitements et des dates de mesure, il est apparu un effet significatif des traitements sur ce paramètre. En effet, le traitement T3 (12-33-19 + compost) a enregistré une production foliaire ($36,23 \pm 0,33$ feuilles/plant) significativement plus importante que celle des autres traitements au 50^{ème} JAS. Ce traitement a induit une production foliaire statistiquement similaire à celle du traitement T2 et significativement plus importante que celles des traitements T0 et T1 aux 65^{ème} et 80^{ème} JAS (Tableau 2). Le témoin T0 (témoin absolu) a obtenu $23,20 \pm 2,83$, $29,95 \pm 1,63$ et $27,55 \pm 3,25$ feuilles/plant respectivement aux 50^{ème}, 65^{ème} et 80^{ème} JAS (Tableau 2).

Tableau 2: variation du nombre de feuilles produites par plant de mil en fonction des traitements suivant les dates de mesure

Traitements	50 JAS	65 JAS	80 JAS
T0	23,20 ± 2,83 ^c	29,95 ± 1,63 ^b	27,55 ± 3,25 ^c
T1	29,68 ± 3,30 ^b	34,63 ± 5,42 ^b	34,03 ± 3,31 ^{bc}
T2	30,83 ± 4,66 ^b	38,20 ± 7,21 ^{ab}	36,10 ± 4,48 ^{ab}
T3	36,23 ± 0,33 ^a	45,75 ± 8,86 ^a	42,25 ± 5,74 ^a
Moyenne	29,98 ± 5,57	37,13 ± 8,25	34,98 ± 6,66
Probabilité	2,295 e-07***	0,004374**	2,931 e-05***

Sur une même colonne, les valeurs accompagnées de lettres identiques ne sont pas significativement différentes.
 * : significatif ; ** : hautement significatif ; *** : très hautement significatif ; NS : non significatif

III.1.2.2 Hauteur des plants du mil

L'analyse a montré que les traitements ont influencé de manière très hautement significative ($P=0.0009018409$) la taille des plants de mil. Les traitements T2 , T1 et T0 ont obtenu des valeurs de hauteur des plants statistiquement équivalentes. Le traitement T3 (12-33-19 + compost) a donné les meilleurs résultats avec une hauteur moyenne de 138,7667 cm. La plus faible hauteur a été observée au niveau du témoin T0 (témoin absolu) avec une hauteur moyenne de 105,9750 cm.

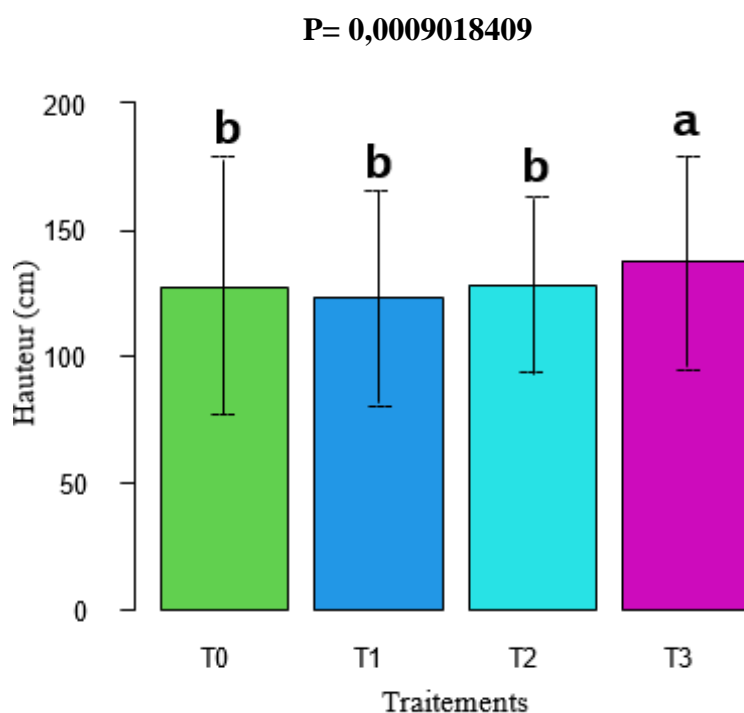


Figure 12: variation de la hauteur des plants de mil en fonction des traitements

Concernant la variation de la hauteur des plants en fonction des traitements et des dates de mesure, les résultats de l'analyse statistique ont montré une différence significative de ce paramètre quelle que soit la date de mesure (Tableau 3). En effet, quelle que soit la date de mesure tous les traitements ont donné une hauteur moyenne des plants significativement plus importante comparée à celle du témoin absolu. Aussi, hormis la date du 50^{ème} JAS, la taille des plants qui ont reçus le traitement T3 (12-33-19 + compost) est plus importante comparée à celle des autres traitements. A la date du 50 JAS, le traitement T1 (15-10-10 ou la formule vulgarisée) a été en valeur absolue plus efficace sur la hauteur des plants de mil avec une valeur moyenne de $89,83 \pm 6,41$ cm (tableau 3).

Tableau 3: variation de la hauteur des plants de mil en fonction des traitements et des dates de mesure

Traitements	50 JAS	65 JAS	80 JAS
T0	61,85 ± 11,39 ^b	111,65 ± 15,10 ^b	144,43 ± 11,72 ^b
T1	89,83 ± 6,41 ^a	152,13 ± 11,72 ^a	174,35 ± 13,47 ^a
T2	85,20 ± 19,54 ^a	139,75 ± 18,28 ^a	167,75 ± 13,53 ^a
T3	83,98 ± 15,79 ^a	153,68 ± 16,50 ^a	183,30 ± 8,36 ^a
Moyenne	80,21 ± 16,89	139,3 ± 22,30	167,46 ± 18,31
Probabilité	0,025*	0,0003166***	3,667 e-05***

Sur une même colonne, les valeurs accompagnées de lettres identiques ne sont pas significativement différentes.

* : significatif ; ** : hautement significatif ; *** : très hautement significatif ; NS : non significatif

III.1.2.3 Tallage du mil

La figure 13 représente la variation du nombre de talles /m² en fonction des traitements.

L'analyse statistique a révélé une différence hautement significative du nombre de talles par m² (P= 0,0056). En effet, les traitements T3 (12-33-19 + compost) et T2 (12-33-19, la nouvelle formule) ont présenté les tallages les plus importants avec respectivement 43,18 et 37,04 talles/m². Les traitements T0 (Témoin absolu) et T1 (15-10-10 , la formule vulgarisée) ont enregistré le plus faible nombre de talles (32,84 talles/m²).

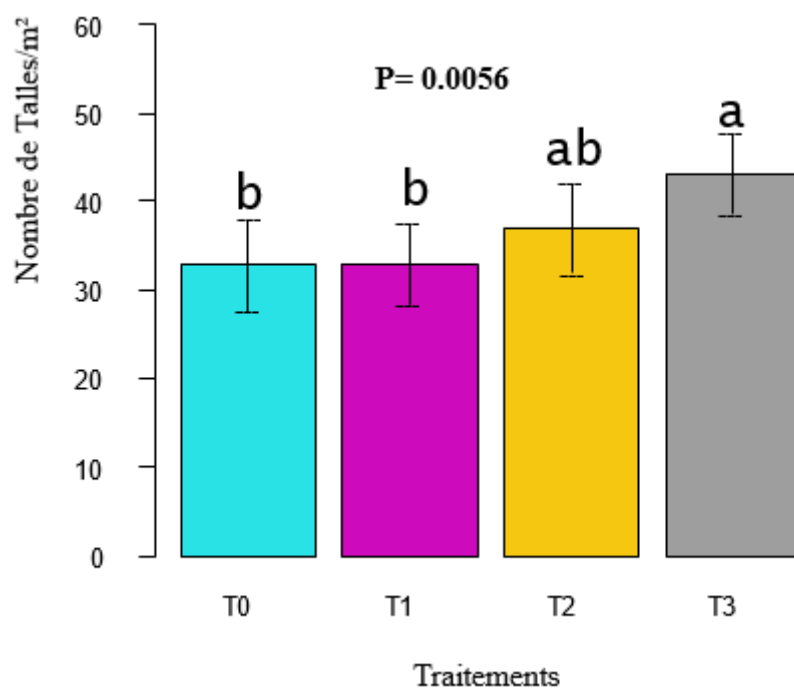


Figure 13 : variation du nombre de talles des plants de mil suivant les traitements

III.1.2.4 Densité des plants de mil

La figure 14 représente l'effet des traitements sur la densité des plants de mil. L'analyse de variance a montré qu'il n'y a aucune différence significative ($P=0,6603$) entre les différents traitements. Néanmoins la densité la plus élevée (15873 pieds/ha) a été obtenue avec le traitement T3 (12-33-19 + compost) et la plus faible a été localisée au niveau du témoin T0 (Témoin absolu) avec une valeur moyenne de 15697 pieds/ha.

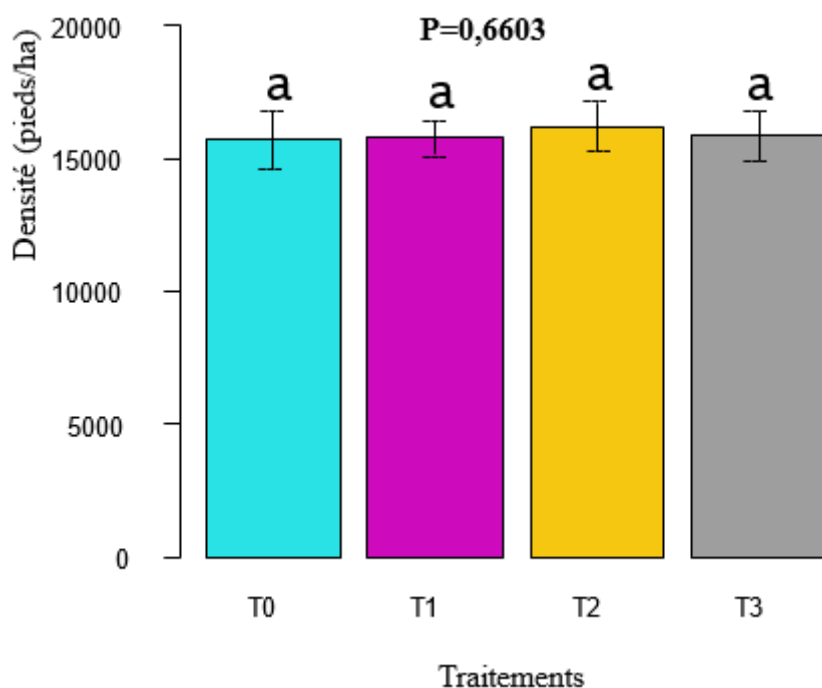


Figure 14 : variation de la densité des plants de mil suivant les traitements

Les résultats de la densité des plants du mil en fonction des traitements suivant les dates de mesure sont présentés dans le tableau 4. Il apparaît à travers ces résultats qu'il n'existe aucune différence significative de la densité des plants entre les traitements suivant les dates de mesure ($P=0,9329$). Néanmoins en valeur absolue, les valeurs de densité les plus élevées ont été obtenues avec le traitement T2 ($16137,5 \pm 1013$ pieds/ha) et les plus faibles au niveau du témoin T0 (Témoin absolu) avec une moyenne de 15697 ± 1205 pieds/ha (Tableau 4).

Tableau 4: variation de la densité des plants de mil en fonction des traitements suivant les dates de mesure

Traitements	65 JAS	80 JAS	95 JAS
T0	15696,5 ± 1204,94 ^a	15696,5 ± 1204,94 ^a	15696,5 ± 1204,94 ^a
T1	15785,0 ± 667,73 ^a	15785,0 ± 667,73 ^a	15785,0 ± 667,73 ^a
T2	16137,5 ± 1012,96 ^a	16137,5 ± 1012,96 ^a	16137,5 ± 1012,96 ^a
T3	15873,0 ± 1038,07 ^a	15873,0 ± 1038,07 ^a	15873,0 ± 1038,07 ^a
Moyenne	15873 ± 910,67	15873 ± 910,67	15873 ± 910,67
Probabilité	0,9329^{ns}	0,9329^{ns}	0,9329^{ns}

Sur une même colonne, les valeurs accompagnées de lettres identiques ne sont pas significativement différentes.

* : significatif ; ** : hautement significatif ; *** : très hautement significatif ; NS : non significatif

III.1.2.5 Diamètre au collet et longueur de la tige des plants du mil

L'analyse de variance concernant le diamètre au collet des plants de mil a montré qu'il existe une différence hautement significative (P-value=0,005813) de ce paramètre entre les différents traitements (tableau 5). En effet, le diamètre moyen au collet des plants est significativement plus élevé avec le traitement T3 (13,98 ± 3,68 mm) comparé aux autres traitements (Tableau 5).

Quant à la longueur moyenne de la tige, elle est significativement plus élevée avec les traitements T3 (12-33-19 + compost) et T2 (12-33-19 ou la nouvelle formule) qui ont enregistré les plus grandes valeurs avec respectivement 145,10 ± 25,65 et 141,30 ± 13,65 cm comparés au témoin T0 (Témoin absolu) avec 128,90 ± 28,74 cm (tableau 5).

Tableau 5 : variation du diamètre (mm) et la longueur de la tige (cm) des plants des mil sounas en fonction des traitements

Traitements	Diamètre au collet (mm)	Longueur tige (cm)
T0	11,73 ± 3,80 ^{bc}	128,90 ± 28,74 ^b
T1	11,68 ± 2,82 ^c	130,03 ± 23,43 ^b
T2	12,95 ± 2,92 ^{ab}	141,30 ± 13,65 ^a
T3	13,98 ± 3,68 ^a	145,10 ± 25,65 ^a
Moyenne	12,58 ± 3,44	136,33 ± 24,37
Probabilité	0,005813**	0,0004883***

Sur une même colonne, les valeurs accompagnées de lettres identiques ne sont pas significativement différentes.

* : significatif ; ** : hautement significatif ; *** : très hautement significatif ; NS : non significatif

III.1.2.6 Diamètre et longueur des épis des plants du mil

Le tableau 6 représente la variation du diamètre et de la longueur de l'épi suivant les traitements.

L'ANOVA a montré que les traitements ont eu un effet significatif sur le diamètre de l'épi (P-value=0,0612 *) et non sur sa longueur (P-value=0,2941673). En effet, le traitement T3 (12-33-19 + compost) a enregistré le diamètre moyen des épis le plus élevé statistiquement (16,30 ± 3,03 mm). Le plus faible diamètre moyen des épis est obtenu au niveau du témoin avec 13,28 ± 4,15 mm (Tableau 6).

Tableau 6 : variation du diamètre (mm) et de la longueur de l'épi (cm) du mil en fonction des traitements

Traitements	Diamètre épis (mm)	Longueur épis (cm)
T0	13,28 ± 4,15 ^c	45,48 ± 13,04 ^a
T1	15,95 ± 9,37 ^{bc}	51,35 ± 19,55 ^a
T2	15,82 ± 3,02 ^{ab}	50,10 ± 8,51 ^a
T3	16,30 ± 3,03 ^a	54,78 ± 19,08 ^a
Moyenne	15,34 ± 5,63	50,43 ± 15,93
Probabilité	0,001546 **	0,2941673^{ns}

Sur une même colonne, les valeurs accompagnées de lettres identiques ne sont pas significativement différentes.
 * : significatif ; ** : hautement significatif ; *** : très hautement significatif ; NS : non significatif

III.1.2.7 Rendement et ses composantes

Les résultats relatifs au rendement et ses composantes sont consignées dans le tableau 7. Ces résultats ont indiqué qu'il existe une différence très hautement significative du nombre d'épis produits ($P=1,597 \times 10^{-14}$ ***) et du rendement épis ($P= 0,0002862$ ***) entre les traitements (tableau 7). Par contre, aucun effet significatif des traitements n'a été observé pour les autres paramètres.

En effet, le traitement T3 (12-33-19 + compost) a enregistré la plus grande valeur en termes de nombre d'épis produits avec une moyenne de 129287 ± 14447 épis/ha. Le plus faible nombre d'épis produits est observé avec le témoin absolu T0 (63100 ± 8890 épis/ha).

Concernant le rendement en épis, la même tendance a été observée. En effet, le rendement épis est significativement plus élevé avec le traitement T3 ($1886,15 \pm 197,99$ kg/ha) et plus faible avec le témoin absolu témoin ($279,32 \pm 85,28$ kg/ha) (tableau 7).

Même si les traitements n'ont eu aucun effet significatif sur le rendement en grains du mil ($P=0,2579$) et le poids mille grains ($P=0,364$), en valeur absolue, le traitement T3 (12-33-19 + compost) a donné le rendement grains le plus important ($567,36 \pm 154,52$ kg/ha) et le traitement T2 (12-33-19) ou nouvelle Formule a enregistré le poids des 1000 grains le plus élevé avec $7,73 \pm 1,39$ g (tableau 7).

Tableau 7 : variation du rendement et ses composantes en fonction des traitements

Traitements	Nombre d'épis récolté /ha	Rendement épis (kg/Ha)	Rendement en grains (kg/ha)	Poids 1000 G rains (g)	Indice de récolte
T0	63100,25 ± 8889,90 ^c	600,14 ± 171,47 ^c	279,32 ± 85,28 ^a	6,63 ± 0,75 ^a	0,08 ± 0,03 ^a
T1	98422,75 ± 7709,06 ^b	1028,81 ± 740,83 ^{bc}	508,10 ± 309,88 ^a	7,12 ± 0,72 ^a	0,09 ± 0,06 ^a
T2	94993,25 ± 13222,67 ^b	1543,21 ± 442,73 ^{ab}	558,47 ± 300,59 ^a	7,73 ± 1,39 ^a	0,09 ± 0,05 ^a
T3	129286,75 ± 14446,77 ^a	1886,15 ± 197,99 ^a	567,36 ± 154,52 ^a	6,94 ± 0,49 ^a	0,07 ± 0,02 ^a
Moyenne	96450,62 ± 26270,29	1264,57 ± 647,28	478,31 ± 241,10	7,11 ± 0,91	0,08 ± 0,04
Probabilité	1,597 e-14***	0,0002862***	0,2579 ^{ns}	0,364 ^{ns}	0,8468 ^{ns}

Sur une même colonne, les valeurs accompagnées de lettres identiques ne sont pas significativement différentes.

* : significatif ; ** : hautement significatif ; *** : très hautement significatif ; NS : non significatif

III.1.2.8 Biomasse paille (tige + feuilles) et biomasse aérienne totale du mil

La variation de la biomasse en paille et de la biomasse aérienne totale en fonction des traitements est consignée dans le tableau 8.

L'ANOVA a révélé une différence très hautement significative de la production en paille ($P=3,06 \text{ e-}05^{***}$) et de la biomasse aérienne totale ($P= 0,000131^{***}$) entre les différents traitements. Le traitement T3 (12-33-19 + compost) a donné les meilleurs rendements en paille ($7373,12 \pm 442,73 \text{ kg/ha}$) et en biomasse aérienne totale ($7374,02 \pm 442,82 \text{ kg/ha}$) comparé au témoin T0 (Témoin absolu) qui a enregistré $3172,16 \pm 706,98 \text{ kg/ha}$ en paille et $3172,59 \pm 707,12 \text{ kg/ha}$ en biomasse aérienne totale (tableau 8).

Tableau 8 : variation de la biomasse paille (tige et feuilles) et de la biomasse aérienne totale du mil suivant les traitements

Traitements	Biomasse en paille (kg/ha)	Biomasse aérienne totale (kg/ha)
T0	3172,16 ± 706,98 ^c	3772,29 ± 740,83 ^c
T1	4886,83 ± 1024,03 ^b	5915,64 ± 1757,02 ^b
T2	5315,50 ± 593,98 ^b	6858,71 ± 928,67 ^b
T3	7373,12 ± 442,73 ^a	9259,26 ± 626,11 ^a
Moyenne	5186,90 ± 1674,78	6451,48 ± 2261,71
Probabilité	3,06 e-05***	0,000131***

Sur une même colonne, les valeurs accompagnées de lettres identiques ne sont pas significativement différentes.

* : significatif ; ** : hautement significatif ; *** : très hautement significatif ; NS : non significatif

III.1.2.9 Taux d'accroissement (TA) en grains de mil

Le taux d'accroissement en grains des traitements par rapport au témoin vulgarisé a été représenté dans la figure 15. L'analyse de cette dernière a montré que le traitement T3 (12-33-19 + compost) a enregistré un TA de 11,66% soit 1,75% de plus que T2 (12-33-19 ou la nouvelle formule) qui a un TA de 9,92%.

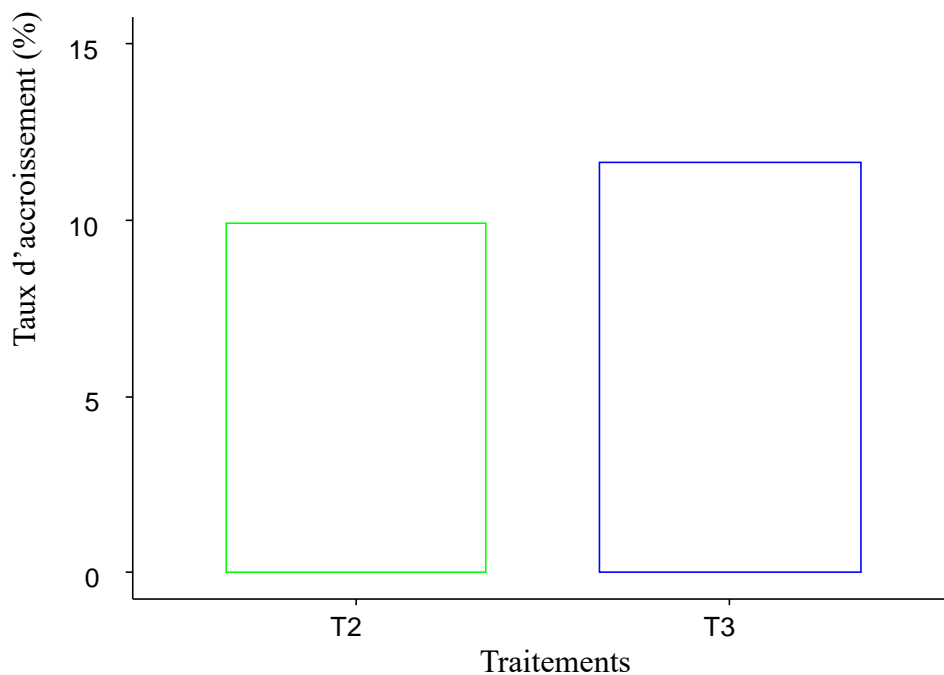


Figure 15: Taux d'accroissement en grains des traitements par rapport au témoin vulgarisé

III.1.3 Relation entre les paramètres étudiés et les traitements appliqués

L'analyse en composantes principales (ACP) a été faite sur la base des paramètres de croissance et de production des plants de mil et des traitements testés. Les dimensions Dim1 et Dim2 absorbent 89,8% de la variabilité étudiée, ce qui est suffisant pour une bonne représentation graphique de l'information contenue dans la matrice.

Ainsi, l'analyse de la figure 16 a permis de distinguer trois groupes de traitements :

- le groupe A constitué du traitement T2 (12-33-19) ou nouvelle formule qui influence le poids de 1000 grains (7,4 g), le rendement en grains (533,28 kg/ha), la production en épis (1886,15 kg/ha), le diamètre au collet (14 mm), la longueur de la tige (145,1 cm), le diamètre de l'épi (15,9 mm) et l'indice de récolte (0,09) ;

- le groupe B constitué des traitements T1 (15-10-10) ou formule vulgarisée et T3 (12-33-19 + compost) qui influent positivement sur la hauteur des plants (171,1 cm), la production de talles (43,2 talles/m²), la production foliaire (42,3 feuilles), le nombre d'épis/ha (129287 épis/ha), la production en paille (7373,11 kg/ha), la production de biomasse aérienne totale (7374,02 kg/ha), le taux de matière organique (0,69%), le taux de carbone (0,40%), le taux d'azote (0,04%), le pH_{eau} (5,33), la quantité de phosphore assimilable (5,08 ppm) et la conductivité électrique (34,18 $\mu\text{s.cm}^{-1}$);
- le groupe C constitué du témoin T0 (Témoin absolu) influe fortement sur le rapport C/N (9,61) et négativement sur l'ensemble des paramètres de croissance et de production (Figure16).

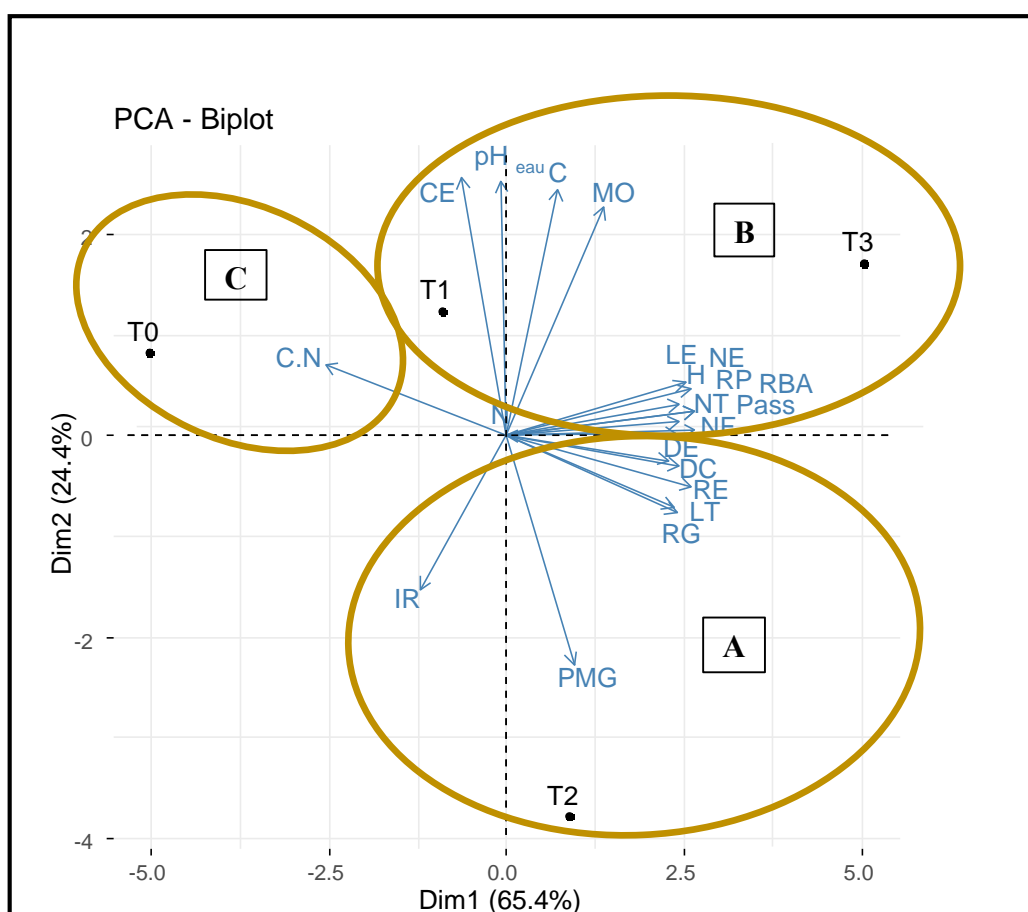


Figure 16 : relation entre les traitements testés et les variables étudiées

III.2 Discussion

Ce travail avait pour objectif d'évaluer l'efficacité d'une nouvelle formule d'engrais (12-33-19) sur les propriétés chimiques du sol et sur les performances agronomiques du mil (*Thialack 2*) en station en Moyenne Casamance.

Effet des traitements sur les propriétés chimiques du sol

Le pH est une donnée très importante qu'il faut prendre en compte car comme l'explique Bacye (1993), les quantités d'éléments nutritifs disponibles dans le sol au cours du cycle cultural, déterminent la qualité de la nutrition minérale des plantes et en grande partie, les rendements des cultures. En effet, le pH_{eau} mesure l'acidité de la solution du sol. Il donne une idée des ions H⁺ libres contenus dans la solution du sol et non fixés à ce moment.

Les résultats ont montré que les traitements n'ont induit aucun effet significatif sur le pH, le taux d'azote ainsi que le rapport C/N. Cela infirme les travaux de Wangs et *al.*, (2010) qui ont signalé que le pH du sol tend à diminuer dans une moindre mesure avec l'apport de fumure minérale. Le même constat a été fait par Uyo et *al.*, (2000) qui ont révélé l'effet acidifiant des engrais chimiques sur les sols au Nigéria. Ces résultats contredisent aussi ceux de Olusegun (2014) et Traoré (2015) qui avait trouvé un pH plus élevé sur des parcelles témoins que sur des parcelles ayant reçue de la fumure minérale.

Concernant le taux d'azote, il augmente dans tous les traitements par rapport au taux avant la mise en place de l'essai. Ce taux est passé de 0,03 % (T0i) à 0,04 % pour l'ensemble des traitements à la récolte. Cela peut se justifier par les apports simultanés d'azote sous forme d'engrais organique et/ou minérale, ce qui contribue à augmenter l'azote total du sol et à terme contribue à un enrichissement du sol en azote (Sedogo, 1993).

Par ailleurs, la plus forte quantité de P assimilable a été observée avec la formule d'engrais qui avait le niveau de P élevé : c'est la nouvelle formule (12-33-19). Des résultats similaires ont été rapportés par Traoré (2015) lorsqu'elle apportait des doses semblables d'engrais sur les mêmes types de sol. Lompo (2009) explique ces teneurs élevées par le fait qu'à un pH compris entre 5,5 et 7, on retrouve le P fixé sur les oxydes de fer et d'aluminium et sur les argiles donc inutilisable par les plantes. Donc les faibles rendements observés sont peut-être liés à la non disponibilité de cet élément pour les plantes.

Quant à la MO et le rapport C/N, nos résultats montrent que les traitements ont eu un effet significatif sur le taux de MO entre l'état initial (T0i) et l'état final. Par contre, aucune différence significative n'a été notée entre les traitements à la récolte néanmoins T3 enregistre

le meilleur résultat ($0,69 \pm 0,07\%$). Les résultats obtenus montrent des rapports de C/N qui sont inférieures à 10. En se référant à la classification du projet PNUD/FAO Gui 72/004, nous pouvons dire que la matière organique évolue de façon satisfaisante dans ces sols. Cependant, cela illustre plus la faiblesse de la teneur en matière organique des sols étudiés. Les valeurs élevées de matières organiques sont à relier avec les conditions d'évolution défavorables (acidité, défaut d'aération). D'après Dabin (1970 c), une bonne teneur en matière organique dans un sol sableux doit être supérieure à 11 %.

Pour calculer la teneur en matière organique du sol (MO %, ou g/100g de sol sec), la teneur en carbone du sol (C %) est multipliée par un coefficient de valeur 1,72. Cette valeur correspond à la proportion moyenne de carbone dans la matière organique du sol (cette proportion doit être 58%). Les pourcentages de matière organique obtenus, après application de la formule précédente sont inférieurs à 2%. En conclusion, bien que l'évolution de la matière organique dans ces sols soit jugée satisfaisante, il faut cependant signaler que sa teneur reste insuffisante.

S'agissant de la conductivité électrique (CE), en se référant à la classification de Durand (1983), nous avons des sols avec des horizons non salés par suite du fait de leurs faibles valeurs de CE qui sont inférieures à $500\mu\text{s/cm}$. Sur ces sols, la salinité est négligeable et n'aura aucun effet sur le rendement des cultures. En effet, la conductivité électrique des sols détermine leur degré de salinité. Cette salinité se traduit par un comportement différent des cultures vis-à-vis des classes de salinité. L'échelle de Durand (1983) a été utilisée pour indiquer la classe de salinité des sols et l'effet sur le rendement des cultures.

Effet des traitements sur les paramètres de croissance du mil

Les résultats ont montré que le traitement T3 (la fertilisation organo-minérale) a donné les meilleurs résultats sur le nombre de feuilles produites/plante (41,41 feuilles/plant). Cela peut s'expliquer par le fait que l'application des amendements organiques et d'engrais minéraux rend plus disponible les éléments de croissance des plantes tels que le phosphore comme l'indique Somda et *al.* (2017). Ces résultats sont en phase avec les travaux de Eldin (1990) et Chaibou (2013) selon lesquels la nutrition azotée est importante pour la croissance végétative du mil.

Par ailleurs, les résultats ont également montré que pendant la phase végétative (50 JAS), le traitement T1 a été plus efficace sur la hauteur des plantes ($89,83 \pm 6,41$ cm), tandis que pendant la montaison (65 JAS) et la floraison (80 JAS), les plantes les plus hautes ont été observées avec la fertilisation organo-minérale avec respectivement des valeurs moyennes de $153,68 \pm$

16,50 et $183,30 \pm 8,36$ cm. Ce retard d'effet de l'amendement par rapport à l'engrais minéral peut s'expliquer par la vitesse de minéralisation des amendements organiques. En effet, les constituants des amendements organiques ne sont pas directement disponibles, ils doivent d'abord être minéralisés (Asdrubal et *al.*, 2006 et Segnou et *al.*, 2012). Des résultats similaires ont été trouvés par Cissé (1988), Somda et *al.* (2017) et Gueye (2016) qui ont montré un effet positif de la fertilisation organo-minérale sur la hauteur respectivement des plants de mil, de sorgho et de fonio.

La production de talles la plus importante a été notée avec le traitement T3 (43,18 talles/m²). Cela peut s'expliquer par l'utilisation de la dose maximale de FMR confirmant ainsi les travaux d'Eldin (1990). Ce dernier a montré une augmentation du nombre de talles du mil suite à une fertilisation minérale. De même cette fertilisation organo-minérale a donné le diamètre au collet le plus élevé ($13,98 \pm 3,68$ mm). Ces résultats confirmant ceux de Bilong et *al.* (2017) qui ont noté une influence significative des apports de matières organiques combinés aux engrais minéraux sur le diamètre des tiges de manioc.

Effet des traitements sur les paramètres de production du mil

Pour les paramètres de production, la combinaison de l'amendement et la fertilisation minérale a un effet positif tant sur les paramètres de croissance que sur les paramètres de production à l'exception du rendement en grains et le poids des 1000 grains. Néanmoins, le traitement T3 a été plus efficace sur le rendement en grains ($567,36 \pm 154,52$ kg/ha). En effet, l'ajout de l'engrais organique (compost) à l'engrais minéral a permis des gains additionnels en grains. La fertilisation organo-minérale aurait donc apporté les éléments nutritifs nécessaires au développement et à la production du mil avec des accroissements en rendements du mil comme l'avait indiqué Maman et *al.* (2000). L'application des engrais minéraux est une source d'éléments nutritifs utilisables immédiatement par la plante pour son alimentation comme l'avaient indiqué Hien (2004), Dutordoir (2006) et Efthimiadou et *al.* (2010). Quand ces engrais minéraux sont associés aux matières organiques, l'assimilation des éléments nutritifs qu'ils apportent est encore plus favorisée (Hien, 2004 ; Dutordoir, 2006 ; Efthimiadou et *al.*, 2010). Par ailleurs, le nombre d'épis, le rendement en épis, et la biomasse des tiges aériennes ont augmenté suite à une application croissante des doses d'engrais minéral.

Le compost quant à lui aurait amélioré les propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol et alimenté de façon progressive la plante par la libération des éléments nutritifs. Hien (2004) a relevé le rôle bénéfique des fumures organo-minérales dans l'amélioration du statut organo-minéral du sol sur les propriétés physiques du sol dont la densité apparente, la porosité

et l'état hydrique. Il a montré que l'apport de matières organiques sous forme de fumier, de compost ou de paille en association avec de l'engrais minéral, notamment N, permettait un accroissement simultané de la productivité et la stabilité interannuelle des rendements. Il note par ailleurs que la fertilisation par des engrais minéraux en association avec la fumure organique améliore plus la production de façon substantielle tout en assurant une meilleure protection des sols contre la baisse de la fertilité chimique. Ces résultats corroborent ceux de Bamba (2020) qui a montré un effet significatif de la fertilisation organo-minérale sur les paramètres de croissances et de productions du mil Sanio.

Pour la variation du poids des 1000 grains, les résultats ont montré qu'il n'y a pas une différence significative entre les traitements. Le poids varie entre 6,63 et 7,73 g. Ces résultats sont similaires à ceux de Diouf (2001) sur le mil. Par contre, ce poids est inférieur à celui trouvé par Diouf et *al.* en 2014 qui varia de 10 à 12g. Cela peut s'expliquer par un mauvais remplissage des grains. Cette absence de différence entre les traitements, peut s'expliquer par le fait que nos semences proviennent de la même variété. En effet, le poids des 1000 grains fait partie des principaux caractères physiques qui permettent de discriminer les variétés (Ouattara et *al.*, 2015). Ainsi, selon ce dernier, le poids varie entre 9,2 et 13,7g pour le mil. Des résultats similaires ont été trouvés par Cheik et *al.* (2006) et Békoye (2014). Le poids moyen d'un grain dépend de la phase de remplissage des grains (Rouw et *al.*, 2004).

Les résultats ont montré que l'ajout du compost à la nouvelle formule d'engrais minéral a permis des gains additionnels en paille. En effet, la fertilisation organo-minérale aurait apporté les éléments nutritifs nécessaires au développement et à la production du mil avec des accroissements en rendements (Maman et *al.*, 2000). Les engrais minéraux sont une source d'éléments nutritifs utilisables immédiatement par la plante pour son alimentation et quand ils sont associés aux matières organiques, l'assimilation des éléments nutritifs apportés par les engrais minéraux est encore favorisée (Hien, 2004 ; Dutordoir, 2006 ; Efthimiadou et *al.*, 2010) d'où une augmentation de la production en paille. Comme l'ont démontré Fatondji et *al.* (2001), Ouédraogo et *al.* (2001) et Palé et *al.* (2009), l'application du compost a généralement permis un accroissement des rendements par sa lente libération des nutriments aux stades critiques de croissance des plants.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Cette étude menée à la station de recherche de l'ISRA à Séfa a permis de mettre en évidence l'effet d'une nouvelle formule d'engrais sur les propriétés chimiques du sol et sur les performances agronomiques du mil souna (*Thialack 2*) en station en Moyenne Casamance.

Les résultats ont montré que la combinaison de l'amendement et la fertilisation minérale a un effet positif tant sur les paramètres de croissance que sur les paramètres de production à l'exception du rendement en grains et le poids des 1000 grains. Toutefois, le traitement T3 a été plus efficace sur le rendement en grains. Par ailleurs, l'ajout du compost à la nouvelle formule d'engrais minéral a permis des gains additionnels en paille. Pour les propriétés chimiques du sol, les traitements n'ont induit aucun effet significatif sur le pH, le taux d'azote ainsi que le rapport C/N mais cet effet est significatif sur la conductivité électrique, les teneurs en carbone et en matière organique et le Phosphore assimilable. La plus forte quantité de P assimilable a été observée avec la formule d'engrais qui avait le niveau de P élevé : c'est la nouvelle formule (12-33-19). Quant à la MO, les pourcentages obtenus sont inférieurs à 2%.

En guise de perspectives, il serait nécessaire de reconduire l'essai en station et en milieu paysan pour confirmer ou infirmer les résultats et de tester aussi cette nouvelle formule d'engrais sur d'autres variétés de mil.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abga P. T. (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 Faso. Mémoire d'ingénieur du développement rural ; option agronomie. Université polytechnique de Bobo, Burkina Faso. 70P.
- Adam T. (2003).** Cours d'Agriculture Spéciale Agro3. Faculté d'Agronomie, Université Abdou Moumouni, Niamey.
- Afiniki BZ. (2005).** Early sowing and métalaxyl seed treatment reduced incidence of pearl millet downy mildew [*Sclerospora graminicola* (sacc.)] in Samaru, Nigeria. *Journal of Plant Protection Research*, **45**(3): 163-169. [http://www.plantprotection.pl/PDF 45\(3\)/JPPR](http://www.plantprotection.pl/PDF%2045(3)/JPPR).
- Ahmadi N, Chantereau J, Hekimian Lethève C, Marchand JL., Ouendeba B, (2002).** Le mil. In Mémento de l'agronome: Les céréales. CIRAD-GRET (ed). Ministère des Affaires étrangères ; 17-23 p.
- Akanza K. P., Sanogo S., N'Da H. A. (2016).** Influence combinée des fumures organique et minérale sur la nutrition et le rendement du maïs : Impact sur le diagnostic des carences du sol. *Tropicultura*. 34 (2) 208- 220.
- Akanza, K.P. et Yao-Kouamé, A. (2011).** Organomineral Fertilization of Cassava (*Manihot esculenta* Crantz) and Diagnosis of Soil Deficiencies. *Journal of Applied Biosciences*, 46, 3163-3172. <http://www.m.elewa.org/JABS/2011/46/6.pdf>
- Anonyme. (2004).** Evaluation de l'impact de techniques d'intensification sur la production de mil à l'échelle du territoire du Niger, p. 186.
- Anonyme., (2014).** La fertilisation et les sols : les experts en parlent. *International Fertilizer Industry Association (IIFA)*, 28 rue Marbeuf, 75008, Paris, France. 8 p.
- ANSD. (2022).** « Bulletin Mensuel des Statistiques Economiques et Financières de Juillet 2022 ». Résultats définitifs de la campagne agricole 2021/2022. ISSN 0850 – 1467. <http://www.ansd.sn>
- Aparna V. (2003).** Phylogenetic analysis of *Sclerospora graminicola* using internal transcribed spacer region-2. *Master thesis*, Texas A&M University, Texas, p. 51.
- Asdrubal M., Sylvie D., Charonnat C., Denys F., Fresse J.C., Thomas J .M., (2006).** Fertilisation et amendements. Educagri éditions, 131 pages.

Ati H.M, Aba DA, Ishiyaku MF, Katung MD. (2015). Field Evaluation of Some Pearl Millet Genotypes for Downy Mildew (*Sclerospora graminicola*) Resistance and Yield. *IOSR Journal of Agriculture and Veterinary Science (IOSR-JAVS)*, 8(6): 01-06. DOI: 10.9790/2380-08620106.

Ba M.F, Samba SAN, Bassene E. (2014). Influence des bois rameaux fragmentés (BRF) de *Guiera senegalensis* (J.F.) Gmel et de *Piliostigma reticulatum* (Dc) Hochst sur la productivité du mil, *Pennisetum glaucum* (L.). *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, 8(3): 1039-1048. DOI: <http://dx.doi.org/10.4314/ijbcs.v8i3.18>.

Bacyé B., (1993). Influence des systèmes de culture sur l'évolution du statut organique et minéral des sols ferrugineux et hydromorphes en zone soudano-sahélienne. (Province du Yatenga, Burkina Faso). Thèse de doctorat en Sciences. Université de Droit, d'Economie et des Sciences d'Aix-Marseille III. 243 pages.

Badiane A. (2014). Vulnérabilité du système sol-plante au stress hydrique : cas d'un sol cultivé en maïs (*Zea mays* L.) avec apport de matière organique en zone soudano-sahélienne au Sénégal. Thèse de doctorat. Spécialité : Biotechnologies Végétales et Microbiennes et Amélioration des Plantes, Université Cheikh Anta DIOP de Dakar, 160p.

Baize D., Duval O., Richard G.(2013). Les sols et leurs structures. Ed. Quae. Col. Synthèses. 264 pages.

Bamba B. (2020). Analyse des pratiques culturales et des techniques de semis et de fertilisation du mil Sanio [*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br] au Sénégal Oriental et en Casamance (Sénégal). Thèse de doctorat en Sciences Agronomiques et Environnement, spécialité Agroforesterie et Productions Végétales. Ecole Doctorale Sciences, Techniques et Ingénierie (EDSTI). Université Assane Seck de Ziguinchor, UFR des Sciences et Technologies, 125 pages + annexes

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.

Békoye B.M., (2014). Caractérisation physico chimique et technologique des variétés de mil *pennisetum glaucum* (l.) R. Br.) Ouest africaines. In: *European Scientific Journal.*; vol.10, No.30 ISSN: 1857 – 7881 (Print) e - ISSN 1857- 7431, 10 pages.

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.

Bilong P., (2017). Effets des biomasses vertes de *Tithonia diversifolia* et des engrais minéraux sur la croissance, le développement et le rendement du manioc (*Manihot esculenta* Crantz) en zone forestière du Cameroun. Article in *Int. J. Biol. Chem. Sci.* 11(4): 1716-1726, 2017, 11 p

Boissezon (P. de), (1965). - Les sols de savane des plateaux Batéké. Cah. ORSTOM, sér. Pédol., Vol. III, n° 4 : 291-304.

Bouzou IM. (2009). Evaluation de l'effet du compost enrichi avec des urines hygiénisées sur la culture du mil. Mémoire, Université de Niamey, Niamey, p.52.

Brunken JN. (1977). A systematic study of *Pennisetum* (Gramineae). *Am. J. Bot.*, 64(2): 161-176. DOI: <https://doi.org/10.1002/j.1537-2197.1977.tb15715.x>

Butler EJ. (1907). Some diseases of cereals caused by *Sclerospora graminicola*. Calcutta, 2: 124.

Chaïbou Z., (2013). Effet du phospho-compost sur la production du mil (*Pennisetum glaucum* (L.) R.Br.) : cas de la commune urbaine de Niamey. Mémoire de Master II à l'Université Polytechnique de Bobo-Dioulasso (UPB), Option : Science du sol, Spécialité : Gestion Intégrée de la Fertilité des sols, 56 p.

Charreau, C., Nicou, R., (1971). L'amélioration du profil cultural dans les sols sableux et sablo-argileux de la zone tropicale sèche Ouest-Africaine et ses incidences agronomiques. *Agron. Trop., Bull. Agron.* 23, 254~.

Chauvel, A, (1977). -Recherches sur la transformation des sols ferrallitiques dans la zone tropicale à saisons contrastées. Evolution et réorganisation des sols rouges de moyenne Casamance. Thèse, université de Strasbourg. ORSTOM, Paris. Coll. Trav. et DO., n° 62, 532 pp.

Cheik A.T.O., Savadogo A., Bayane Y. et Traore S. A., (2006). A Comparative Study on Nutritional and Technological Quality of Fourteen (14) Cultivars of Pearl Millets [*Pennisetum glaucum* (L) Leeke] in Burkina Faso. In: *Pakistan Journal of Nutrition* 5 (6): 512- 521, ISSN 1680-5194, © Asian Network for Scientific Information, 10 pages.

Cisse L., (1988). Influence d'apports de matière organique sur la culture de mil et d'arachide sur un sol sableux du Nord Sénégal. II. – Développement des plantes et mobilisations minérales. EDP Sciences, 1988, 8 (5), pp.411-417. , 08 pages.

Cissé, L., (1986). Etude des effets d'apports de matière organique sur les bilans hydriques et minéraux et la production du mil et de l'arachide sur un sol sableux dégradé du Centre-Nord du Sénégal. Doctorat, INP de Lorraine, 1986, 184 pp.

Cissé, L., Vachaud, G., (1988). Influence d'apports de matière organique sur la culture de mil et d'arachide sur un sol sableux du Nord-Sénégal. 1. - Bilans de consommation, production et développement racinaire. *Agronomie* 8(4), 3 15 326.

Culot M. et Lebeau S., (1999). Le compostage, une pratique méconnue de gestion des déchets. *Bulletin d'information AIGx* 5/1999, 11-17 p.

Dabin B. (1970c)- Les facteurs chimiques de la fertilité des sols, la Techniques, in techniques Rurales en Afrique, pédologie et développement, ORSTOM et BDPA, Paris, 278 p.

DAPSA. (2016). Résultats définitifs de la campagne 2015-2016. DISA/DAPSA/MAER, Dakar (Sénégal), 8p.

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.

Dembéle I., (1994). Production et utilisation de la fumure organique. Fiche synthétique d'information, 19 p.

Dick, R. (1997) Soil Enzyme Activities as Integrative Indicators of Soil Health. In: Pankhurst, C.E., Doube, B.M. and Gupta, V.V.S.R., Eds., *Biological Indicators of Soil Health*, CAB International, Wallingford, UK. 1997 pp.121-156 ref.136.

Diouf M., (1990). Analyse de l'élaboration du rendement du mil (*Pennisetum typhoides* Stapf et Hubb) mise au point d'une méthode de diagnostic en parcelle paysanne. *Thèse de doctorat*, Institut National Agronomique. Paris-Grignon, 248 pages.

Diouf N., Ndiaye O., Mar A., et Diallo M., (2014). Le mil. Exposé, 14 pages.

Diouf O., (2001).La culture du mil (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.) en zone semi-aride : bases agrophysiologiques justificatives d'une fertilisation azotée. Mémoire de titularisation ISRA. 75p. DOI: <https://dx.doi.org/10.4314/ijbcs.v13i1.40>

Kadri A., Halilou H., Karimou I. (2019) : Culture du mil [*Pennisetum glaucum* (L) R. Br] et ses contraintes à la production : une revue ; 524 p.

Duchaufour P., Faivre P., Poulenard J., Gury M., (2018). Introduction à la science du sol 7^e Edition. 472pages.

Durand J.H. (1983) – Les sols irrigables, Etude pédologique. Ed. Département de géographie de l'université de Paris – Sorbonne, 389 p.

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. 214 p.

Eftimladou A, Bilalis D, Karkanis A, Froud-Williams B. (2010). Combined organic/inorganic fertilization enhance soil quality and increased yield, photosynthesis and sustainability of sweet maize crop. *Aust. J. Crop Sci.*, 4(9): 722-729.

Eldin O., (1990). Croissance et développement du mil (*Pennisetum typhoides*) sous deux conditions de fumure minérale, ISTOM. 53 p.

Emerson, W, (1959). The structure of soil crumbs. - *Journal of Soil Science*, 1959, 10(2), 235-244.

FAO, (1997). L'économie mondiale du sorgho et du mil : faits, tendances et perspectives. . FAO, Rome, 68 pp.

FAOSTAT. (2015). <http://faostat3.fao.org/download/Q/QC/F/>

Fatondji D, Martius C, Vlek, P. (2001). Zaï - A traditional technique for land rehabilitation in Niger. ZEFnews, 8: 1–2.

Fitzpatrick, E. A. (1983). Soil organic matter analysis: A compilation of available methods. EPA/600/3-83/012. United States Environmental Protection Agency, Environmental Monitoring and Support Laboratory, Cincinnati, OH.

- Francou C., (2003).** Stabilisation de la matière organique au cours du compostage de déchets urbains: Influence de la nature des déchets et du procédé de compostage-Recherche d'indicateurs pertinents (Doctoral dissertation, INAPG (AgroParisTech)), 290 p.
- Frisque M. (2007).** Gestion des matières organiques dans les sols cultivés en Région wallonne : avantages agronomiques, avantages environnementaux et séquestration du carbone. 102pages.
- Ganry, F., Bideau, J., 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.
- Gelin, S., & Stengel, P., (1998).** Sol : interface fragile. Paris : Editions INRA. Synthèse du projet FAO Land Degradation Assessment (LADA). 222p
- Gobat J M., Aragno M Et Mathey W., (2010).** Le sol vivant bases de pédologie–biologie des sols (3eme Ed., Vol.1). Italie : Revue et Augmentée Page 51-60.
- Gobat J. M., M. Aragno, W. Matthey., (1998).** Le Sol Vivant. Bases De Pédologie Biologie Des Sols. Presses Polytechniques Et Universitaires Romandes, Lausanne 848 pages.
- Gueye M., 2016.** Amélioration des techniques de semis, de fertilisation et de récolte du fonio blanc (*Digitaria exilis* Stapf ; Poaceae) au Sénégal Oriental et en Casamance (Sénégal). Thèse doctorant, faculté des sciences et techniques, université cheikh Anta Diop de Dakar, 137 pages.
- Hamadou BH. (2015).** Evaluation de trois méthodes de lutte contre le mildiou du mil (*Sclerospora graminicola*): variété, densité et traitement. Mémoire, Université Dan Dicko Dankoulodo De Maradi (UDDM), Maradi ; p. 69.
- Hamadou M, Idrissa S, Mahamadou C, Oumarou S, Valentin K. (2017).** Potentialités fourragères du mil (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br) : Revue de littérature. *Journal of Animal & Plant Sciences*, **34**(2): 5424-5447. <http://www.m.elewa.org/JAPS>.
- Hausmann BIG. (2007).** Données récoltées dans la base de données du Programme de sélection du mil à l'ICRISAT.
- Henin S., Monnier G., Gras R., (1969).** Le profil cultural. Masson, Paris, 2' édition, 332 pp.
- Hien E. (2004).** Dynamique du carbone dans un Acrisol ferrique du Centre-Ouest Burkina : Influence des pratiques culturales sur le stock et la qualité de la matière organique. Thèse de

doctorat en Sciences des Sol, Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier, France, 138 p.

Hinvi, J.C., Nonfon, R.C., Djenontin, J.P.A., Mensah, G.A., Gantoli, G et Horst, O., (2012). Fiche technique : Effets de la fumure organo-minérale sur le rendement de NERICA dans les Départements de l'Atacora et la Donga au Nord-Ouest du Bénin, 1 p. <https://doi.org/10.4314/ijbcs.v8i4.24>

IBPGR ET ICRISAT. (1993). Descripteurs du mil pénicillaires [*Pennisetum glaucum* (L) R. Br]. Conseil international des ressources phylogénétiques, Rome, Italie; Institut International de Recherches sur les Culture des Zones Tropicales Semi-arides, Patancheru, Inde ; p. 49.

Illiassou Y. (2009). Evaluation de l'effet de l'application périodique de l'urine hygiénisées sur la culture de mil (*Pennisetum glaucum*). Mémoire, Université Abdou Moumouni de Niamey, Niamey ; p. 39.

ISRA, ITA, CIRAD. (2005). Bilan de la recherche agricole et agroalimentaire au Sénégal. Institut sénégalais de recherches agricoles, p 524

Jogaiah S, Ananda KS, Shekar SH, (2008). Characterization of downy mildew isolates of *Sclerospora graminicola* by using differential cultivars and molecular markers. *Journal of Cell and Molecular Biology*, 7: 41-55. <http://jcmb.halic.edu.tr>.

Kanfany G. (2017). Genetic studies of the pearl millet (*Pennisetum glaucum* (L.) R.Brown) downy mildew resistance in Senegal. Thesis is submitted to the university of Ghana, Doctor of philosophy degree in plant breeding, 147 p.

Kéita C., (1985). Fumures minérales et organiques. Mémoires d'ingénieur du Développement Rural. Option : Agronomie. IDR/UO. Burkina Faso. 90p.

Kitabala M. A., Tshala U. J., Kalenda M. A., Tshijika I. M., et Mufind K. M., (2016). Effets de différentes doses de compost sur la production et la rentabilité de la tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill) dans la ville de Kolwezi, Province du Lualaba (RD Congo). *Journal of Applied Biosciences*, 102, 9669-9679 p.

Kouakou (K.), (1981).- Etude de la dynamique actuelle d'un sol ferrallitique sous jachère de trois ans, sous jachère de vingt ans et sous forêt en basse côte d'Ivoire. Rapport de stage (ENSA d'Abidjan). ORSTOM, Adiopodoumé, 16pp., multigr.

Kouakou P. K., Muller B., Guissé A., Yao R. N., Fofana A. et Cissé N. (2013). Étude et prise en compte en modélisation de l'effet de la latitude sur la réponse à la photopériode chez divers génotypes de mil (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.) du Sénégal. *J. Appl. Biosci.*, 67: 5289-5301, ISSN 1997-5902. www.m.elewa.org/JABS/2013/67/Abstract12-kouakou.html

Koulibaly B.; Dakuo D. ; Ouattara A. ; Traoré O. ; Lompo F. ; Zombré P. N. ; Yao Kouamé A., (2015). Effets de l'association du compost et de la fumure minérale sur la productivité d'un système de culture à base de cotonnier et de maïs au Burkina Faso. *Tropicicultura*, 33 (2) 125-134.

Kumar A., K., and Andrews, D. J. (1993). Genetics of qualitative traits in pearl millet: a review. *Crop Sci.* 33, 1-20.

Kumar, K. A. (1989). Millet perlé: état actuel et potentiel futur. *Outlook on Agriculture*, 18(2), 46-53. <https://doi.org/10.1177/003072708901800201>

Lacharme, M., (2001). La fertilisation minérale du riz. Direction de la Recherche Formation Vulgarisation, Ministère du Développement Rural et de l'Environnement. 2001 a. p. 19, Fascicule 6.

Lal, R., Reginer, E., Eckert, D. J., Edwards, W. M., and Hammond, R. (1991). Expectation for cover crops for sustainable agriculture. In: *Cover Crops for Clean Water*, pp. 1–11.

Leclerc., (2009). La fertilisation organique en agriculture biologique. *Agronomie*, Fiché n°6, 04 p.

Locatelli A., (2013). Prévalence de pathogènes humains dans les sols français, effet des facteurs pédoclimatiques, biologiques et du mode d'utilisation des sols. 187pages.

Lompo F., (2009). Effets induits des modes de gestion de la fertilité des sols sur les états du phosphore et la solubilisation des phosphates naturels dans deux sols acides du Burkina Faso, université de Cocody/UFR, 254p. Thèse de doctorat.

Loumerem M. (2004). Etude de la variabilité des populations de mil (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.) cultivé dans les régions arides tunisiennes et sélection de variétés plus performantes. Thèse, Université de Gen, Gen, p. 266.

MAER, M. de l'Agriculture et de l'Équipement R. (2012). *Catalogue officiel des variétés de mil au Sénégal* (p.67). p. 67. Sénégal, Dakar.

Maertens, C. (1964). La resistance mécanique des sols à la penetration: Ses facteurs et son influence sur l'enracinement. *Ann. Agron.*, 15, 5; 539 - 554.

Maiti RK, Bidinger FR. (1981). Growth and development of the pearl millet plant. Research Bulletin N°6, ICRISAT Patancheru, Patancheru, p. 19.

Maman, N., Ibrahima, A., Aboubacar, T., & Issoufou, B. (2000). Effet de la fertilisation organo-minérale sur le rendement du mil (*Pennisetum glaucum*) en zone sahélienne du Niger. *Sécheresse*, 11(1), 31-36.

Manga, A.H.S., (2019). Effets de différents types de composts, du phosphogypse et de la fertilisation minérale sur les propriétés chimiques et biochimiques d'un sol sulfaté acide et le rendement du riz à Djibélor (Basse Casamance). 52 pages.

Masse D., Hien V., Bilgo A., Diatta M., Manlay R., Chotte Jean-Luc. (2007). Matières organiques et activités biologiques dans les sols tropicaux des cycles cultures-jachère. In : Cornet Antoine (ed.), Hamrouni H. (ed.). Territoires et aridité au nord et au sud du Sahara: la lutte contre la dégradation des terres, bilan des acquis et nouvelles perspectives de recherche: actes du séminaire. Sols de Tunisie, (no spécial 2), p. 115-133. Territoires et Aridité au Nord et au Sud du Sahara : La Lutte contre la Dégradation des Terres, Bilan des Acquis et Nouvelles Perspectives de Recherche : Séminaire, Tunis (TUN), 2005/06/13. ISSN 0330-2059.

Mbaye DF. (1993). Contraintes phytosanitaires du mil dans le sahel: Etat des connaissances et perspectives. In *Le Mil en Afrique : Diversité Génétique et Agro-physiologie: Potentialités et Contraintes pour l'Amélioration Génétique et l'Agriculture*, Serge H (éds). ORSTOM : Paris ; 173-186.

Merelle F., (1998). L'analyse des terres d'aujourd'hui. Nantes, France : Edition GEMAS. 184 p.

Millington, R. et Quirk, J., (1961). Permeability of porous solids. - *Transactions of the Faraday Society*, 1961, 57, 1200-1207.

Millogo D., (2002). Diagnostic des modes de gestion de la fertilité des sols dans les systèmes de culture motorisés en zone cotonnière ouest du Burkina Faso. 94 pages.

Moumouni KH. (2014): Construction d'une carte génétique pour le mil, *Pennisetum glaucum* (L.) R.Br, par une approche de génotypage par séquençage (GBS). Mémoire, Université de Laval de Québec, Québec, 111 p.

Murphy J. & Riley I.P., (1962). A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Anal. Chim. Acta* 27:31-6.

Mustin M., (1987). Le compost, gestion de la matière Organique. Editions François Dubusc, Paris. 954 pages.

Ndiaye A., (2018). Effet de la fertilisation organo-minérale sur la croissance et le rendement du mil Sanio (*Pennisetum glaucum* L. R. Br) en Haute Casamance (Sénégal). Mémoire de master en Agroforesterie. Université Assane Seck de Ziguinchor (UASZ). 40 p.

Ndiaye A., et Sawané O. (2015). Etude des pratiques locales du mil tardif en parcelles paysannes en Haute Casamance. Mémoire de licence au département d'Agroforesterie de l'Université Assane Seck de Ziguinchor, 37 p.

Ndiaye A., Fofana A., Ndiaye A., Mbaye D.F., Sene M., Mbaye I., Chantereau J., (2005). Les céréales. In: Bilan de la recherche agricole et agroalimentaires au Sénégal. Ed ISRA-ISTA-CIRAD, Dakar, Sénégal 241-257 p.

Olusegun O. S., (2014). Influence of NPK 15-15-15 fertilizer and pig manure on nutrient dynamics and production of cowpea, *vigna unguiculata* L. Walp. *American journal of Agriculture and Forestry*. vol. 2, No. 6, 2014, pp. 267-273. doi: 10.11648/j.ajaf.20140206.16

Ouattara L.T.S., Bationo F., Parkouda C., Dao A., Bassole I.H.N., et Diawara B., (2015). Qualité des grains et aptitude à la transformation : cas des variétés de Sorghum bicolor, *Pennisetum glaucum* et *Zea mays* en usage en Afrique de l'Ouest. In *international journal of biological and chemical sciences*, 9(6): 2819-2832, December 2015, 14 pages.

Ouédraogo E, Mando A, Zombré NP. (2001). Use of compost to improve soil properties and crop productivity under low input agricultural system. *West Africa Agric. Ecosyst. Environ.*, **84**(3): 259–266. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(00\)00246-2](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(00)00246-2).

Palé S, Mason SC, Taonda SJ-B. (2009). Water and fertilizer influence on yield of grain sorghum varieties produced in Burkina Faso. *S. Afr. J. Plant Soil*, **26**(2): 91- 97. DOI: <https://doi.org/10.1080/02571862.2009.10639939>.

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.

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 CIRADIRAT, Paris. 444 p.

PNUE (1990) – Evaluation globale de la dégradation du sol dans le monde (GLASODISRIC/PNUE/FAO, 1990.

Rao VP, Thakur RP, Rai KN, Sharma YK. (2005). Downy Mildew Incidence on Pearl Millet Cultivars and Pathogenic Variability among Isolates of *Sclerospora graminicola* in Rajasthan. *Journal of SAT Agricultural Research*, 1(1): 1-4. <http://ejournal.icrisat.org.review>. *Crop Sci.* 33, 1-20.

Rocafremi. (2002). Sélection et mise à disposition des paysans de variétés et de semences appropriées. Des résultats du projet P1 : 1991-1996.

Rouw A., Rajot J.L., Schrneler G., (2004). Effets de l'apport de bouses de zébus sur les composantes du rendement du mil, sur les mauvaises herbes et sur l'encroûtement superficiel du sol au Niger, 19 p.

Saidou, A.A. (2011). Etude moléculaire, évolution et caractérisation de gènes impliqués dans l'adaptation du mil (*Pennisetum glaucum [L.] R. Br.*) aux changements climatiques. Sup Agro Montpellier, 237 p.

Sané S. (2018). La station agricole de Séfa (région de sédhiou): analyse géographique du domaine agricole de la période coloniale à nos jours. p. 116.

Sarr P.L., (1986). Fertilisation minérale et organique du mil au Sénégal. Sénégal. 13 p.

Schwartz C., Muller J.C., Decroux J., (2005). Guide de la fertilisation raisonnée, 75010 Paris, Edition France Agricole. 213 p.

Seck A., (1956), La moyenne Casamance, Etude géographique physique. Extrait de la Revue de *Géographie Alpine Tome XLIII*. —N°4. 1-49 p.

Sedogo, M.P. (1993). Evolution des sols ferrugineux lessivés sous culture: influence des modes de gestion sur la fertilité. Thèse de Docteur Es-Sciences, Université Nationale de Côte d'Ivoire, Abidjan.

Segnou .j., akoa a., youmbi e., et njoya j., (2012). Effet de la fertilisation minérale et organique sur le rendement en fruits du piment (*Capsicum annuum* L.; solanaceae) en zone forestière de basse altitude au cameroun. 10 pages.

Sharma YK, Yadav SK, Khairwal IS. (2007). Evaluation of pearl millet germplasm lines against downy mildew incited by *Sclerospora graminicola* in western Rajasthan. SAT Journal, 3(1): 1-2. <http://ejournal.icrisat.org>.

Siene L.A.C., Muller B., Aké S., (2010). Étude du développement et de la répartition de la biomasse chez deux variétés de mil de longueur de cycle différente sous trois densités de semis. *J. Appl. Biosci.*, 35: 2260-2278. ISSN 1997-5902. www.m.elewa.org/JABS/2010/35/5.pdf. Consulté en Avril 2021.

Six, J., K. Paustian, Elliott E., Combrink C. (2000). Structure du sol et matière organique du sol : I. Distribution des classes de taille des agrégats et du carbone associé aux agrégats. *Soil Science Society of America Journal*, 64 :681-689.

Somda B. B., Ouattara B., Serme I., Pouya M. B., Lompo F., Taonda S. J. B., et Sedogo P. M., (2017). Détermination des doses optimales de fumures organo-minérale en microdose dans la zone soudano-sahélienne du Burkina Faso. In: *International Journal of Biological and Chimical Sciences*, 11 (2): 670-683, 15 p.

Sudhakar R, Reddy PN, Bharathi V. (2012). Downy Mildew Disease of Pearl Millet (Bajra): Infection, Damage and Management Strategies. *International Journal of Bio-resource and Stress Management*, 3(1): 103-108. http://www.pphouse.org/20_IJBSM.

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 agro morphologique de la collection nationale de mils locaux du Sénégal. *Journal of Applied Biosciences* 87:8030– 8046. ISSN 1997–5902.

Tamia, A., Moreau, R., Fortier, M., (1999). Influence du travail du sol sur l'évolution physique d'un sol forestier ferrallitique après défrichement motorisé. *Étude et Gestion des Sols* 14p.

Thakur RP, Rai KN, Khairwal IS, Mahala RS. (2008). Strategy for downy mildew resistance breeding in pearl millet in India. *Journal of SAT Agricultural Research*, 6: 1-11. <http://ejournal.icrisat.org>.

Thakur RP, Rao VP, Amruthesh KN, Shetty HS, Datar VV. (2003). Field surveys of pearl millet downy mildew-Effects of hybrids, fungicide and cropping sequence. *Journal of Mycology and Plant Pathology*, **33**(3): 387–394. <http://www.oar.icrisat.org/JMycolPIPathol>.

Thakur RP, Sharma R, Rao VP. (2011). Screening Techniques for Pearl Millet Diseases. Information Bulletin N°89. Patancheru 502 324, Andhra Pradesh, India: *International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics*, p. 56.

Thomas J.M., (2006). Fertilisation et amendements. Domaine technologique et professionnel, *Educagri éditions*, 131 p.

Tostain, S., Marchais, L., (1993). Evaluation de la diversité génétique du mil (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.) au moyen de marqueurs enzymatiques et relations entre formes sauvages et cultivées. In: Hamon, S. (ed.) Le mil en Afrique. Diversité génétique et agro physiologique : potentialités et contraintes pour l'amélioration génétique et l'agriculture. Oratom, Paris, pp. 33-56.

Traoré O. 1., (2015). Mineral fertilizer application and grain yield of two maize varieties in the sub-sudanian zone of Burkina Faso. Master of philosophy in soil science, Kwame Nkrumah University of science and technology Kumasi, Ghana School of graduate studies department of crop and soil sciences. Ghana 99 p.

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 non 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).

Upadhyaya HD, Reddy KN, Sastry DVSSR. (2008). Directives pour la régénération: mil à chandelles. In: Crop specific regeneration guidelines [CD-ROM]: CGIAR System-wide Genetic Resource Programme (SGRP), Dulloo ME, Thormann I, Jorge MA, Hanson J (ed). Italy, Rome, 1-10.

USAID. (2017). Evaluation de la consommation des céréales de base au Sénégal. Livrable 3, Juillet 2017. Projet Feed the future Natal Mbay, 108 pages.

Uyo Y. E. O. et Elemo KA., (2000). Effect of inorganic fertilizer and foliage of *Azadirachta* and *Parkia* species on the productivity of early maize, *Nigerian Journal of Soil Research*, 17-22p.

Wang B. R., Cai Z. J. et Li D. c., (2010). Effect of different long-term fertilization on the fertility of red upland soil. *Journal of soil and water conservation* 24: 85-88.

Wey, J., Siband, P., Oliver, R., Egoumenides, C., (1987). Essai de régénération d'un sol de la zone arachidière du centre-nord du Sénégal. *Agron. Trop.* **42**(4), 258- 267.

Wilson JP, Sanogo MD, Nutsugah SK, Angarawai I, Fofana A, Traore H, Ahmadou I, Muuka FP. (2008). Evaluation of pearl millet for yield and downy mildew resistance across seven countries in sub-Saharan Africa. *African Journal of Agricultural Research*, **3**(5): 371-378. <http://digitalcommons.unl.edu/intormilpubs/33>.www.iosrjournals.org DOI: 10.9790/2380-1106021019

Yoro G., (1983). Contribution à l'étude de caractérisation de la structure. Identification et évolution des paramètres structuraux de deux types du sol du Nord-ouest de la Côte d'Ivoire. Incidences agronomiques. Thèse doct. Ingénieur, faculté de science, Université Abidjan, 279 p.

Yoro G., Assa A., (1986). Modifications structurales de deux sols ferrallitiques du nord-ouest de la Côte d'ivoire sous l'effet du piétinement par l'homme. *Cah. ORSTOM*, sér. Pédol., vol. XXII, n° 1 : 3 1-41.

Yoro, G et Godo, G., (1990). Les méthodes de mesure de la densité apparente Analyse de la dispersion des résultats dans un horizon donné. *Cah. ORSTOM*, sér. Pédol., vol. XXV, n° 4, 1989-1990 : 423-429.

Zakari AH, Mahamadou B, Adam T. (2016). Les systèmes de productions agricoles du Niger face au changement climatique : défis et perspectives. *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, **10**(3): 1262-1272. DOI: <http://dx.doi.org/10.4314/ijbcs.v10i3.28>.

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.