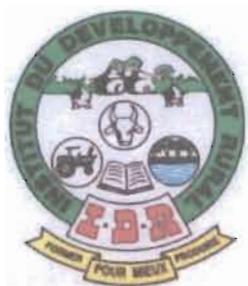


BURKINA FASO
Unité- Progrès- Justice

MINISTRE DES ENSEIGNEMENTS SECONDAIRE ET SUPERIEUR (MESS)

UNIVERSITE POLYTECHNIQUE DE BOBO-DIOULASSO (UPB)

INSTITUT DU DEVELOPPEMENT RURAL (IDR)



MEMOIRE

Présenté par

CHAIBOU Zeinabou

Pour l'obtention du :

Master II

Option : Sciences du sol

Spécialité : Gestion Intégrée de la Fertilité des Sols

THEME :

**Effet du phospho-compost sur la production du mil
(*pennisetum glaucum* (L.)R.Br.)**

Cas de la commune urbaine de Niamey.

Directeur de mémoire : Pr Hassan Bismarck NACRO

Maître de stage : Dr Dan Lamso Nomao UAM Niamey

TABLE DES MATIERES

Table des matières	i
Dédicace	iv
Remerciements	v
Sigles et abréviations	vi
Listes de figures	vi
Liste des photos	vi
Liste des tableaux	vi
Résumé	vii
Abstract	viii
Introduction	1
Chapitre 1 : Synthèse bibliographique	4
<i>Fertilisation organique</i>	4
1.2. <i>Fertilisation minérale</i>	5
1.3. <i>Fertilisation organo-minérale</i>	5
1.4. <i>Problématique de la fertilité des sols</i>	6
1.5. <i>Généralité sur le phosphore et le compostage</i>	6
1.5.1. <i>Phosphore</i>	6
1.5.2. <i>Importance du phosphore dans l'agriculture</i>	6
1.5.3. <i>Le Phosphore dans l'amélioration et le maintien de la fertilité du sol</i>	7
1.5.4 <i>Les problèmes de carence en phosphore dans la région</i>	8
1.6. <i>Le compostage</i>	8
1.6.1. <i>L'intérêt potentiel du compostage</i>	8
1.6.2 <i>L'effet du compost sur le sol et le rendement agricole</i>	8
1.6.2.1. <i>Effet du compost sur le sol</i>	8
1.6.2.2 <i>Effets du compost sur le rendement agricole</i>	9
1.7. <i>Généralités sur le phospho-compost</i>	9
1.7.1. <i>Principes du phospho-compostage</i>	10
1.7.2. <i>Efficacité agronomique des phospho-composts</i>	10
1.7.3. <i>Utilisation des phosphates naturels de la région</i>	10
1.7.3.1. <i>Le phosphate naturel de Tahoua</i>	11
1.7.3.2. <i>Contraintes liées à l'utilisation du phosphate naturel</i>	11
1.8. <i>Généralités sur la culture du mil</i>	12
1.8.1. <i>Origine et répartition géographique</i>	12

1.8.2. Aspects botaniques	12
1.8.3 Caractéristiques morphologiques	13
1.8.4 Cycle végétatif	13
1.8.4.1. Phases végétatives.....	13
1.8.4.2. Phase reproductrice	14
1.8.4.3. Phase de remplissage des grains.....	14
1.8.5 Variété cultivées	15
1.8.6. Ecologie du mil	15
1.8.7 Importance du mil	15
1.8.8. Exigence pédoclimatique	16
1.8.9. Opérations culturales.....	17
1.8.9.1. Préparation du sol.....	17
1.8.9.2. Semis.....	17
1.8.9.3. Entretien.....	18
1.9. Production du mil au Niger.....	18
1.9.1. Contrainte liée à la production du mil au Niger	19
1.9.1.1. Contraintes socio-économique.....	19
1.9.1.2. Contraintes abiotiques ou environnementales.....	20
1.9.1.3. Contraintes biotiques.....	21
Chapitre II. Matériels et méthodes	22
2.1 Matériel	22
2.1.1 Site expérimental	22
2.1.1.1 Localisation géographique	22
2.1.1.2 Climat	23
2.1.1.3 Le sol	23
2.1.2 Le matériel végétal	23
2.1.3 Matériel technique	25
2.1.4. Fertilisation	25
2.2 Méthodes	26
2.2.1. Dispositif expérimental	26
2.2.2. Méthodes d'analyse des sols	27
2.2.2.1. Echantillonnage du sol	27
2.2.2.2 Les analyses physiques et chimiques du sol et des amendements organiques	27
2.2.2.2.1. Mesure du pH	27

2.2.2.2.2. Carbone organique	28
2.2.2.2.3. L'Azote	28
2.2.2.2.4. Dosage du phosphore total et assimilable	28
2.2.2.2.5. Dosage des bases échangeables et Capacité d'échange cationique	28
2.2.2.2.6. La granulométrie	29
2.2.3. Conduite de l'essai	29
2.2.3.1 Mesures et observations agronomiques	29
2.2.3.1.1. Détermination de l'efficacité agronomique des fumures (EAF)	30
2.2.3.1.2. Analyse des données	30
Chapitre III : Résultats et discussion	31
3.1 Expérimentation agronomique	31
3.1.1. Caractérisation du sol et des amendements organiques	31
3.1.1.1. Caractérisation du sol	31
3.1.1.2. Caractéristique du phospho-compost.....	32
3.1.2 Effet du phospho-compost sur la production du mil.	32
Discussion	36
Conclusion et perspectives.....	38
Bibliographie	40
Webographie.....	44
ANNEXES	46

Dédicace

Je dédie ce mémoire de fin de cycle:

Au Seigneur le Tout Puissant de m'avoir assisté tout au long de mes études

A la mémoire de mon père CHAIBOU Badjé, que son âme repose en paix ;

A ma mère HADJARA Mossi pour son amour, sa patience et son encouragement, qu'elle trouve ici le témoignage de ma profonde affection et reconnaissance.

A mes frères et sœurs

A tous ceux qui m'ont soutenue.

Remerciements

Je voudrais remercier le programme AGRA-SHP qui a financé ce Master GIFS.

Mes remerciements vont tout particulièrement à mon promoteur Dr Dan Lamso Nomao, pour m'avoir accordé le stage et mis les moyens à disposition pour réaliser ce travail. Qu'il trouve ici toute ma reconnaissance.

Mes remerciements vont également :

Au Dr ZAKARI Moussa Ousmane, Enseignant –Chercheur, Université Abdou Moumouni de Niamey pour ses conseils et orientations méthodologiques, vos remarques pertinentes avec laquelle vous avez dirigé ce travail ont énormément contribué à l'amélioration de sa qualité ;

Au Pr NATATOU Ibrahim, Coordinateur du Projet Promotion du Phosphate Naturel de Tahoua par phospho-compostage pour son suivi constant et l'intérêt qu'il a porté à notre travail ;

Au Dr Adamou ZANGUINA, Enseignant –Chercheur, Université Abdou Moumouni de Niamey pour son suivi et ses conseils.

Je voudrais témoigner toute ma gratitude au Dr Bernard Bacyé, Coordonnateur du Master GIFS et tous les enseignants intervenant à l'IDR pour la qualité de l'enseignement reçu.

Mes remerciements vont également au Pr Nacro Hassan Bismarck, enseignant-chercheur à IDR de Bobo Dioulasso pour avoir accepté le co-encadrement de ce mémoire malgré ses occupations multiples. Sa disponibilité et ses compétences à encadrer des travaux de recherche m'ont permis de faire de ce mémoire un travail scientifique. Qu'il trouve ici, une fois de plus, mes remerciements inestimables.

A M MAÏLANBA Lokoto, chef des cultures à la Faculté d'Agronomie pour le suivi sur le terrain.

Je voudrais témoigner toute ma gratitude à toutes les bonnes volontés qui ont contribué à la réalisation de ce mémoire.

Sigles et abréviations

DGA:	Direction Générale de l'Agriculture
AGRA:	Alliance Green Revolution for Africa
ANOVA :	Analyse de Variance
C/N :	Carbone/Azote
FAO :	Fond des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture
FCM-NIYA :	Fédération des Coopératives Maraîchères du Niger
GIFS :	Gestion Intégrée de Fertilité du Sol
ICRISAT:	Institut International de Recherches sur les Cultures des Zones Tropicales Semi-arides
IDR :	Institut du Développement Rural
INRAN :	Institut National de la Recherche Agronomique du Niger.
INS :	Institut National des Statistiques
PGRN :	Projet de Gestion des Ressources Naturelles.
pH :	Potentiel Hydrogène
PNT :	Phosphate Naturel de Tahoua

Listes de figures

Figure 1: Localisation de la zone d'étude (Niamey commune V)	23
Figure 2: Cumuls décennaires de la pluviométrie du site expérimental.....	24
Figure 3: Dispositif expérimental de l'essai.	29

Listes des photos

Photo 1: Echantillons du phospho-compost.....	28
---	----

Listes des tableaux

Tableau 1 : Classement des 10 pays producteurs du mil	12
Tableau 2: Données sur la production céréalière de 2003 à 2012 au Niger	19
Tableau 4 : Composition chimique du phospho compost.....	35
Tableau 5 : Effet du phospho-compost sur la croissance végétative du mil.....	36
Tableau 6 : Efficacité agronomique du phospho-compost sur le rendement.....	

Résumé

La faible disponibilité des sols en phosphore est une contrainte à l'intensification de la production agricole au Niger car limitant les rendements. En vue de proposer une méthode efficace de production du phospho-compost de qualité et pour rendre le phosphore plus assimilable par la plante, une étude a été réalisée en milieu réel sur le site expérimental de la faculté d'agronomie. Cette étude se veut une contribution à la recherche de solutions palliatives aux engrais de synthèse importés, par le biais d'une utilisation des phosphates naturels locaux, sources d'éléments nutritifs moins polluantes et facilement accessibles. Le phospho-compost est une technique de compostage de résidus organiques auxquels on additionne du phosphate naturel pour augmenter son efficacité agronomique.

Un suivi de l'effet du phospho-compost sur la production du mil a été réalisé. Le dispositif expérimental est un bloc complet randomisé avec quatre traitements issus de la combinaison entre la matière organique (MO) ,5% et 10% du PNT en trois (3) répétitions. Les paramètres étudiés sont: la croissance et les composantes de rendements.

Les résultats obtenus révèlent que la combinaison matière organique et phosphate naturel (phospho-compost) a permis d'augmenter le rendement du mil $876 \pm 59,65$ et $790 \pm 235,15\text{kg/ha}$ par rapport au témoin et aux parcelles ayant reçu uniquement la matière organique.

Tous les traitements ne montrent cependant pas la même efficacité. Pour assurer une bonne production du mil, les aspects de qualité et des quantités du phospho-composts sont à prendre impérativement en compte pour obtenir les résultats souhaités.

Ainsi, la préservation et la valorisation de nos gisements en phosphate permettrait d'assurer nos productions agricoles.

Mots clés : phospho-compost, mil, fertilisation organo-minérale, Niger.

Abstract

The low availability of soil phosphorus is a constraint to increased agricultural production in Niger as limiting yields. In order to provide an effective method for the production of phospho-quality compost and to make the available phosphorus by the plant, a study was conducted in a real environment on the experimental site of the Faculty of Agronomy. This study is a contribution to the search for remedial synthetic fertilizers imported solutions, through use of local natural phosphates, less polluting sources and readily available nutrients. Phospho-composting is a technique of composting organic wastes which are added rock phosphate to increase on agricultural efficiency.

Monitor the effect of phospho-compost on millet production has been achieved. The experimental design is a randomized complete block with four treatments from the combination of the organic matter (OM), 5% and 10% of PNT in three (3) repetitions.

The parameters studied are: growth and yield components. The results show that the organic matter and rock phosphate (phospho-compost) combination has increased millet yield 876 ± 59.65 and 790 ± 235.15 kg/ ha compared to the control and plots that received only organic matter. All treatments do not, however, show the same efficacy. To ensure good millet production, aspects of quality and quantity of phospho-composts are imperative to take into account to obtain the desired results. Thus, the preservation and enhancement of our phosphate deposits would ensure our agricultural production.

Keywords: phospho-compost, millet, organo-mineral fertilization, Niger.

Introduction

Pays sahélien situé entre 0°6' et 16° de longitude Est et entre 11°23' et 23°17' de latitude Nord, le Niger couvre une superficie de 1 267 000 Km². Une telle situation géographique place une grande partie du Niger dans une zone écologiquement aride dont les 4/5 appartiennent au Sahara. Le 1/5 restant du territoire, relativement humide, concentre l'essentiel de la population (Atlas du Niger, 2001). Selon les dernières prévisions, elle est de 16 274 738 en 2012 (INS, 2012), avec un taux d'accroissement annuel de 3,63% (statistiques mondiales, 2012).

Au Niger, 82% de la population sont des ruraux, avec pour principales activités l'agriculture et l'élevage (SDRP, 2002). Malgré la fragilité du patrimoine agro-écologique du pays, l'agriculture constitue la base de l'économie car elle représente plus de 30% du produit intérieur brut (PIB) (FAO, 2006). Cependant, la production céréalière qui doit couvrir les besoins de la population, est en général déficitaire, la croissance démographique n'est pas accompagnée de celle de la production agricole qui est de 2,2% (Tidjani, 2005), ce qui maintient le pays dans une insécurité alimentaire quasi permanente.

La dépendance de la population nigérienne vis-à-vis des céréales pluviales, en particulier le mil et le sorgho, pose de sérieux problèmes de sécurité alimentaire et rend cette population encore plus vulnérable. En année normale, seulement 1% du territoire reçoit plus de 600 mm et 10% plus de 350 mm (Hanarou, 2011). Ces pluies insuffisantes par endroits, mal réparties et surtout tardives, compromettent généralement les campagnes agricoles de plusieurs régions, engendrant des déficits céréaliers importants et un état de pauvreté de la population.

En plus des conditions pluviométriques défavorables, la fertilité naturelle médiocre des sols et la faible utilisation des engrais minéraux et organiques (Breman et De Wit, 1983 cité par Bationo et al., 2007) sont souvent évoquées pour expliquer le faible rendement des cultures des pays sahéliens. Cependant, l'un des éléments nutritifs le plus limitant de la production agricole est le phosphore (Sedogo, 1981 ; Pieri, 1991 ; Compaoré et al., 2001 ; Lompo, 2009). La concentration des ions phosphates dans la solution des sols est faible et ne permet pas une nutrition phosphatée adéquate des cultures (Compaoré et al., 2001).

Une pratique agricole est considérée comme non durable à chaque fois que la biodisponibilité du phosphore limite les rendements indispensables à la satisfaction des besoins alimentaires (Pieri, 1991).

Pour accroître de façon durable la production agricole, il s'avère nécessaire non seulement d'accroître les teneurs en phosphore des sols mais aussi d'améliorer leur biodisponibilité dans les sols. La correction de cette carence nécessiterait des apports d'engrais phosphatés plus ou moins solubles comme le superphosphate triple, le superphosphate simple et les phosphates naturels.

Dans la plus part de nos pays de l'Afrique de l'Ouest, les engrais minéraux sont importés et reviennent chers. De plus leur utilisation exclusive entraîne à la long une diminution de la matière organique, une acidification des sols, une désaturation du complexe d'échange, une augmentation de la toxicité en aluminium tant de facteurs capables de réduire le rendement.

Le paradoxe est que le Niger en dispose d'importants gisements de phosphates naturels dans le Nord-Ouest du pays, notamment à Tahoua et au niveau du parc W dont la valorisation pourrait contribuer à résoudre les problèmes de carence en phosphore des sols et donc améliorer la production agricoles. Par ailleurs, plusieurs études ont été conduites pour étudier l'importance de la déficience en phosphore des sols, estimer le besoin en phosphore des principales cultures et évaluer le potentiel agronomique des différents engrais phosphatés ainsi que les phosphates naturels locaux (Bationo et *al.*, 1987 ; Pichot et Roche, 1972 ; Jones, 1973 ; Mokwunye, 1979 ; Bationo et *al.*, 1990).

D'autres travaux ont été conduits dans le cadre de la valorisation du phosphates naturels pour proposer des méthodes de fabrication de composts enrichis avec les phosphates naturels à partir essentiellement de pailles de sorgho et de paille de riz (Lompo, 1989). Les techniques du compostage et de phospho-compostage sont particulièrement attrayantes pour un pays comme le Niger en proie à de graves crises alimentaires dues essentiellement à la rareté des pluies et à la dégradation des terres cultivables. En effet, des phosphates naturels moyennement ou faiblement réactifs, peu adaptés pour la production d'engrais entièrement acidulés tels que le superphosphate simple ou triple, peuvent être utilisés dans la fabrication du phospho-compost ; ceci est un moyen de valorisation de ces produits.

Les techniques du compostage et de phospho-compostage fournissent des engrais organiques qui vont non seulement maintenir la fraction organique des sols mais aussi combler en partie les besoins d'éléments nutritifs des plantes. Elles offrent la possibilité de pratiquer une agriculture biologique, qui exclut l'utilisation d'engrais transformés chimiquement et surtout des sous-produits urbains.

Dans certains pays, les phosphates naturels sont utilisés en agriculture comme source de nutriments. En Afrique et particulièrement au Niger, la valorisation du phosphate naturel de Tahoua avec la jacinthe d'eau en agriculture est un aspect sur lequel peu études sont disponibles.

D'où l'intérêt du thème « **Effet du phospho-compost sur la production du mil (*Pennisetum glaucum* [L.] R.Br.)** »

L'objectif général de notre travail est de déterminer l'efficacité agronomique du phospho-compost sur la production du mil.

Plus spécifiquement, il s'agit de :

- Etablir le bilan initial du sol,
- Caractériser le phospho-compost,

- Evaluer l'impact du phospho-compost sur la production du mil.

Ce travail s'articule autour de deux hypothèses :

- La solubilité du phosphore est assimilée et mieux utilisée par le mil ;
- L'utilisation du phospho-compost permet d'améliorer la production du mil ;
- L'utilisation du phospho-compost est une alternative peu coûteuse par rapport à l'emploi des engrais chimiques.

Le présent mémoire qui rend compte du travail qui a été conduit, s'articule autour de trois parties :

- La première partie aborde la revue bibliographique,
- La seconde porte sur les matériels utilisés et les méthodes de travail adoptées pour exécuter les activités de notre étude,
- la troisième partie est consacrée aux résultats et discussions.

Chapitre I : Synthèse bibliographique

1.1. Fertilisation organique

Les matières organiques utilisées dans la fertilisation des sols sont de natures et de formes diverses. Elles sont surtout constituées de fumier, de résidus de culture, du compost et des engrais verts qui sont les sources les plus fréquemment rencontrées en milieu paysan (Diallo, 2002). La diversité serait liée à la nature et la qualité des substrats organiques apportés, à leurs effets sur les caractéristiques du sol, mais aussi à leur aptitude à la biodégradabilité (Akroume, 1985; Lompo, 1997). La matière organique joue un rôle important dans le maintien de la fertilité des sols. En plus d'être source d'éléments nutritifs tels que l'azote, le phosphore, le potassium, le soufre et de plusieurs micronutriments, elle permet d'améliorer les propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols.

Généralement, la matière organique se caractérise par leur rapport C/N, valeur qui traduit le degré de richesse ou de disponibilité azotée et la teneur en lignine ou en phénols (Bado, 1994; Pousset, 2000). Il faut cependant noter que la teneur en lignine et en polyphénols est aussi importante pour déterminer la qualité d'une source organique; plus ces éléments sont en teneur importante, plus la décomposition est lente (Tian, 1998).

En outre, au niveau des végétaux, l'humus ou plus largement la matière organique du sol favorise la croissance et la résistance des plantes par une bonne alimentation en éléments majeurs (N, P, K) et par une disponibilité suffisante en éléments secondaires et oligo-éléments ainsi qu'en divers activateurs (Soltner, 2003). Tout comme les engrais minéraux, les matières organiques fournissent beaucoup d'éléments nutritifs à la plante. L'action positive du fumier sur le sol se traduit sur plusieurs composantes du sol. Ainsi, Delville (1996) cité par Lompo (2005) indique que la matière organique accroît la capacité d'échange cationique et donc la quantité et la disponibilité des éléments minéraux dans le sol. De plus, elle améliore la structure du sol et la rétention de l'eau permettant de réduire l'impact des périodes sèches en cours de culture.

Des expérimentations de longue durée ont montré que des apports de fumier bien décomposé (C/N voisin de 10) permettent d'augmenter le niveau de rendements et de retrouver l'efficacité des engrais (Delville, 1996; Pousset, 2000).

En Afrique, les sources traditionnelles de matières organiques (résidus de récoltes, fumiers, composts) ne peuvent répondre aux besoins de l'agriculture du fait de leur quantité très limitée, de la disponibilité et la restitution des matières organiques qui constituent un problème chez la majorité des producteurs, de leur qualité médiocre et de la difficulté de leur transport dans les champs qui nécessitent beaucoup de travail.

En conclusion, les matières organiques sont la base de la fertilité, de la conservation des sols et de la qualité des productions végétales.

1.2. Fertilisation minérale

Un engrais est une substance le plus souvent destinée à fournir aux plantes (par l'intermédiaire du sol) les éléments nécessaires à leur nutrition. Cela peut être un ou plusieurs éléments minéraux, jugés insuffisamment abondants dans le sol pour nourrir les cultures.

En Afrique de l'Ouest, des nombreuses études ont été menées depuis l'introduction des engrais chimiques, dans le but d'adapter l'utilisation des engrais aux exigences des cultures en éléments nutritifs au regard de la valeur nutritive des sols.

Les engrais chimiques peuvent à long terme entraîner une acidification des sols d'où des risques de toxicité aluminique (Sedogo, 1993; Soltner, 2003). Un chaulage ou un complément de fumure organique corrige la baisse du pH, du carbone et de la CEC du sol (Sedogo, 1981). Il atténue les effets acidifiants de l'engrais. Selon Maatman et *al.*, (2008), les quantités d'engrais minéraux utilisés en Afrique sont autour de 8 kg/ha/an (Bationo et *al.*, 1998), ce qui représente seulement 10% de la moyenne mondiale. De nombreuses études démontrent que l'utilisation judicieuse d'engrais minéraux conduit à une augmentation des rendements (Buerkert et *al.*, 2001; Bationo et *al.*, 1998,) à condition qu'aucun autre facteur de croissance (tels que l'eau et le rayonnement) ne devienne restrictif. Par ailleurs, bien que l'importance des engrais minéraux ait été bien établie, leur utilisation reste très limitée en Afrique de l'Ouest à cause du coût relativement élevé, l'inefficacité du système de distribution, les politiques agricoles inadéquates, le faible taux de recouvrement des engrais azotés et d'autres facteurs socio-économiques. L'Afrique sub-saharienne possède le plus faible taux de consommation en engrais au monde avec environ 8 kg nutriments ha/an (Bationo et *al.*, 1998). L'application d'engrais minéraux est inférieure de 5 kg/ha/an dans la zone soudano-sahélienne (Buerkert et *al.*, 2001) et seulement 0,8 kg/ha/an au Niger (Sivakumar et Salaam, 1999). Les engrais importés sont chers et difficiles d'accès dans les campagnes. En outre, leur achat doit s'effectuer à la période de l'année où la plupart des paysans souffrent de problèmes de revenus (période de soudure).

1.3. Fertilisation organo-minérale

La nécessité d'utiliser à la fois les fertilisants organiques et minéraux pour assurer la durabilité de la fertilité des sols et de la production agricole a été reconnue. Cela est dû à des interactions positives et complémentaires entre ces deux types de fertilisants (Vanlauwe et *al.*, 2001). L'une des bases de cette complémentarité est que les fertilisants organiques améliorent les teneurs du sol en matières organiques et des aspects associés à la fertilité des sols, tandis que les fertilisants minéraux fournissent les nutriments limitant. Pour Sedogo (1981), « le maintien ou l'augmentation des rendements à un niveau élevé et à moindre coût dans une agriculture intensive, passe par l'adjonction de la fumure organique à la fumure minérale».

Les fumures organo-minérales permettent d'obtenir des rendements plus ou moins stables et plus élevés que ceux obtenus avec les fumures exclusivement minérales. Ce mélange permet d'avoir, également le meilleur bilan azoté, un bilan positif en calcium, une stabilité ou une augmentation du taux de matière organique et de la capacité d'échange cationique (Lompo et *al.*, 1993 cités par Lompo, 2005). Ainsi, la fumure organo-minérale pourra augmenter les

rendements et par conséquent, réduire le coût de la fertilisation. La fumure organique est donc un facteur important de maintien de la fertilité, et l'efficacité des engrais minéraux semble liée à la quantité de matière organique présente dans le sol (Sedogo et al., 1997 cités par Diallo, 2002).

Hafner et al., (1993), cités par Lompo (2009) ont montré à travers une expérimentation sur sol acide du Niger, que l'incorporation de résidus culturaux en présence de fertilisation minérale, améliore non seulement la quantité de P en solution dans le sol, mais également l'absorption de P par les plantes, même en année de faible pluviométrie.

1.4. Problématique de la fertilité des sols

Dans les zones sahéniennes, des études ont montré que la baisse de la fertilité des sols était le plus souvent accompagnée d'un déficit du bilan organique et minéral et d'une acidification croissante (Sanders et Garcia, 1993; Bationo et al., 1997; Ganry et Badiane, 1998). Les bilans d'éléments nutritifs sont négatifs pour la plupart des systèmes culturaux. Une prise d'élément nutritif, plus importante que l'apport au niveau des exploitations agricoles, explique ce bilan (Bationo, 1995). Ainsi, des quantités substantielles d'éléments nutritifs peuvent être perdues dans les systèmes de cultures permanents ou sédentaires à travers les exportations par les cultures (dans les graines et les résidus de récolte) et les pertes par ruissellement, lessivage et par volatilisation.

Les sols de la zone sahéniennne ont des teneurs faibles de carbone organique et d'azote total à cause d'une part, de la faible production de biomasse et d'autre part, à cause d'un taux de minéralisation très élevé (Mokwunye et al., 1996). L'appauvrissement des sols en éléments nutritifs est souvent compliqué par la faible fertilité initiale des sols dont 80% ont des limitations physiques ou chimiques pour la production agricole (Sanchez, 1976).

1.5. Généralité sur le phosphore et le compostage

1.5.1. Phosphore

Le phosphore occupe une place très importante dans la vie végétale et animale. En plus de leur rôle dans l'agriculture, les phosphates sont aussi utilisés dans les industries chimique, alimentaire, et en médecine pour ne citer que ceux-là.

1.5.2. Importance du phosphore dans l'agriculture

Les phosphates sont des produits vitaux pour l'agriculture, qu'elle soit intensive ou en pleine expansion ; ils intéressent de très près les économies agricoles de tous les pays développés comme ceux en voie de développement. Le phosphore est classé avec l'azote et le potassium comme un constituant fondamental à la vie des plantes et des animaux. Il représente un élément capital pour la croissance et le développement de la plante. Il favorise le développement racinaire, et a aussi un rôle essentiel dans la fécondation, la mise en fruit, et la qualité des grains (Mémento de l'agronome, 1991 ; Lompo, 2009). Il est à retenir que l'absence de phosphore pour

une plante, entraîne un retard de croissance se traduisant par la réduction de la croissance des cellules et des feuilles, de la respiration et de la photosynthèse. Selon Compaore (1996), lorsque le phosphore du sol qui est prélevé par les plantes (phosphore bio disponible) devient limitant, l'agriculture peut être considérée comme non durable; donc un système agricole durable veut que le phosphore apporté aux sols maintienne ou accroisse les niveaux de phosphore bio disponible. Les composés phosphatés interviennent dans l'accumulation et la libération de l'énergie indispensable au métabolisme cellulaire, à la formation de la graine, au développement du système racinaire et à la maturation des cultures (Soltner, 1994). Le phosphore est donc incontestablement un élément capital pour l'amélioration de la production agricole car une terre privée de phosphore pendant plusieurs campagnes agricoles s'épuise et les rendements baissent.

Au Niger, Buerkert et al., (1998), cités par Soma, (2010) notent que l'application du phosphore à un sol acide augmente la concentration en acide phytique dans les grains de 25 à 29 %. Ses teneurs dans le sol et dans la plante varient très largement en fonction des types de sols et des espèces variétales cultivées. On admet généralement que la teneur en phosphore total des sols est d'environ 1 pour mille (soit 0.1 p.c ou 1g kg⁻¹ sol ou 1 kg t⁻¹). Il y est présent pour 2/3 sous forme minérale et pour 1/3 sous forme organique (Lompo, 2009). Il ressort clairement que pour atteindre un développement durable, la présence de phosphore bio disponible en quantité suffisante dans le sol est indispensable. Pour maintenir cette quantité de phosphore indispensable au développement des plantes, il faut nécessairement procéder à des apports réguliers de cet élément sur les sols qui en sont dépourvus. C'est ainsi que l'homme intervient par l'utilisation des engrais et autres matières fertilisantes pour non seulement améliorer le statut du sol mais aussi pour apporter les éléments nutritifs nécessaires aux plantes.

1.5.3. Le Phosphore dans l'amélioration et le maintien de la fertilité du sol

Le phosphore a un rôle crucial pour l'amélioration et le maintien de la fertilité des sols à travers les effets suivants:

- l'amélioration des propriétés physiques des sols par la formation d'agrégats et l'augmentation de la capacité de rétention : des expérimentations au champ ont montré que l'application du phosphore augmente le taux d'agrégats stables dans l'eau.
- l'amélioration de la structure des sols par les engrais phosphatés, entraîne du même coup des effets sur la densité apparente et la capacité de rétention en eau des sols (Lompo., 2009) ;
- l'amélioration de la capacité d'échange cationique (CEC) des sols : les engrais phosphatés améliorent la CEC des sols. Cette amélioration de la CEC est d'autant plus importante que les sols concernés ont des surfaces spécifiques élevées pour fixer d'importantes quantités de phosphore ;

- l'amélioration de la matière organique: l'application de phosphore joue un rôle important dans l'amélioration et le maintien de la matière organique des sols en stimulant la croissance, la densité et la longueur des racines qui sont des sources de matière organique stables et résistantes à la biodégradation;
- l'accroissement de la biomasse microbienne qui est un facteur primordial pour la fixation d'azote chez les légumineuses.

1.5.4. Les problèmes de carence en phosphore dans la région

La carence en phosphore (P) représente une contrainte majeure pour la production agricole en Afrique de l'Ouest, Bationo et *al.*, (1998), la réponse aux engrais azotés ne devenant effective que lorsque l'eau et le phosphore ne sont plus un facteurs limitant (Traore, 1974). Près de 80% des sols de l'Afrique sub-saharienne sont carencés en phosphore. L'importance de la déficience en phosphore, l'estimation des besoins en P des principales cultures et l'évaluation de l'efficacité de différents types d'engrais phosphatés ont fait l'objet de nombreuses recherches (Brouyer.1954) et (Pichot.1972).

Cependant, le niveau d'engrais phosphatés utilisé par les paysans reste très faible à cause du coût élevé des engrais importés. Ainsi, l'Afrique sub-saharienne utilise 1,6kg de P/ha contre 7,9 et 14,9 pour l'Amérique latine et l'Asie, respectivement. Il importe donc d'y valoriser au mieux l'engrais P importé ou les ressources locales de phosphates naturels.

1.6. Le compostage

Le compostage est un processus naturel de décomposition de la matière organique par les micro-organismes dans des conditions bien définies. Les matières premières organiques, telles que les résidus de culture, les déchets animaux, les restes alimentaires, certains déchets urbains et les déchets industriels appropriés, peuvent être appliqués aux sols en tant que fertilisant, une fois le processus de compostage terminé.

1.6.1. L'intérêt potentiel du compostage

Les propriétés du compost sont principalement dues à la formation des complexes colloïdaux argilo-humiques. Son utilisation est intéressante à plusieurs points de vue quant aux effets qu'elle peut engendrer (ZANGUINA., 2011). Le compost a un effet positif sur la biologie et les caractéristiques physico-chimiques du sol. La matière organique est un élément essentiel pour la faune du sol. Elle constitue une source d'énergie et un réservoir d'azote pour la synthèse de leurs tissus. Les litières, par leur contenu minéral, leur richesse en glucides, en protéines, en lignines etc., peuvent influencer le déterminisme et l'activité de la faune du sol. Ainsi, Ouédraogo et al., (2004) ont montré que la densité des termites était fortement corrélée à la nature de la matière organique. Ils préfèrent la matière organique récalcitrante (Ouédraogo et al., 2004). Les vers de terre quant à eux préfèrent les herbes tendres, les fumiers ou les composts (Bachelier, 1971).

1.6.2. L'effet du compost sur le sol et le rendement agricole

1.6.2.1. Effet du compost sur le sol

Les composts livrent au sol de la matière organique plus ou moins stabilisée suivant le degré de maturité du produit. Environ la moitié du carbone organique ainsi apporté est intégrée de manière durable dans le sol et forme ce que l'on appelle l'humus stable. Grâce à cet humus, la structure du sol et sa porosité sont améliorées (Fuchs, 2009). Ceci influence positivement la régulation hydrique des parcelles ayant été amendées, diminue les effets de l'érosion et améliore l'aération du sol. Du point de vue chimique, les composts apportent une quantité non négligeable d'éléments fertilisants. Particulièrement intéressants sont l'apport en calcium, qui explique en partie les effets positifs des composts sur la valeur du pH des sols, et l'apport en oligoéléments essentiels pour l'équilibre des plantes.

La biologie du sol est principalement influencée de deux manières (Fuchs, 2009). D'une part, le compost livre aux microorganismes telluriques du substrat sur lesquels certains peuvent se développer. Plus le compost est jeune, plus cet effet est important, les substances facilement dégradables y étant en plus grandes quantités. D'autre part, l'activité et l'équilibre microbien du sol peut être influencés par les microorganismes apportés par le compost. Si le compost a été produit selon les règles de l'art, sa microflore est bénéfique, les agents pathogènes sont en effet dégradés pendant la phase thermophile du processus tandis que des agents antagonistes se développent pendant la phase de maturation.

L'amélioration des caractéristiques chimiques, physiques et biologiques des sols par des amendements de compost créent de meilleures conditions de croissance pour les plantes. Ces dernières sont ainsi moins stressées, ce qui les rend plus résistantes aux maladies. En plus de leur action indirecte, les composts peuvent, suivant leur qualité microbiologique, influencer directement la santé des plantes par l'action de microorganismes antagonistes qu'ils contiennent. Ces derniers agissent directement sur les agents pathogènes présents dans le sol en les concurrençant, les parasitant ou les inhibant (Fuchs, 2009).

1.6.2.2. Effets du compost sur le rendement agricole

L'utilisation du compost sur les cultures est très intéressante non seulement de par son apport en éléments fertilisants, mais également de par ses effets sur la fertilité des sols et sur la santé des plantes. (Fuchs, 2009). Ces éléments nutritifs affectent le rendement et la qualité de production. Les travaux de Ouattara et *al.*, (2006) ont montré que l'utilisation de compost permet d'accroître les rendements en coton graine ce qui confirme l'intérêt de la fumure organique dans l'amélioration de la production. Le compost des ordures ménagères permettent une nette amélioration des rendements des cultures maraichères et céréalières grâce à l'amélioration des propriétés physico-chimique et biologiques des sols à moyen et long terme. (Abdoulaye et *al.*, 2007).

1.7. Généralités sur le phospho-compost

Diverses techniques sont utilisées pour améliorer l'efficacité agronomique de certains phosphates naturels. Le compostage de résidus organiques auxquels on additionne du phosphate naturel est un moyen biologique d'augmenter l'efficacité agronomique des phosphates naturels appliqués comme engrais phosphatés : c'est ce qu'on appelle le phospho-compostage. Le traitement des phosphates naturels avec matériaux organiques et leur compostage est une technique prometteuse pour augmenter la solubilité des phosphates naturels et la disponibilité du phosphore (P) pour les plantes.

1.7.1. Principes du phospho-compostage

L'augmentation de la libération de phosphore par les phosphates naturels semble être une fonction de l'acidification du phosphate naturels par les acides organiques et surtout de leur capacité de chélation sur le calcium (Ca), le fer (Fe) et l'aluminium (Al) (Pohlman et McColl, 1986). L'acide fulvique est la plus réactive des substances humiques en adsorbant des quantités significatives de Ca^{2+} et en libérant des ions H^+ , augmentant de ce fait la dissolution du phosphate naturel. L'acide humique peut former des complexes avec le phosphore et le calcium, et créer un puits entraînant une augmentation de la dissolution du phosphate naturel (Singh et Amberger, 1990). L'application au sol de substances humiques augmente également le phosphore disponible pour les plantes du fait de la concurrence dans le sol pour les sites de rétention du phosphate et de la formation d'un enduit protecteur autour de ces sites. Un avantage additionnel de l'application de phospho-compost est le mouvement du phosphore dissous à une plus grande profondeur dans le sol, ce qui permet l'exploration d'un plus grand volume de sol pour l'absorption de phosphore par les plantes.

1.7.2. Efficacité agronomique des phospho-composts

Une augmentation de l'efficacité agronomique du phosphate naturel dans les phospho-composts par rapport au phosphate naturel directement appliqué est prévisible en raison de sa plus grande teneur en phosphore hydrosoluble et soluble dans l'acide citrique, phosphore qui serait disponible pour les plantes. D'après certains auteurs, les fractions solubles de phosphore devraient stimuler la croissance racinaire et faciliter une plus grande exploitation du sol enrichi en phosphore (Habib et al., 1999). Des résultats des études antérieures ont montré que le phospho-compost préparé en mélangeant des résidus de l'exploitation agricole, des déjections de bétail et du sol peut être aussi efficace que le superphosphate simple (Palaniappan et al., 1993 cité par ZANGUINA, 2009) ; même lorsqu'il est appliqué sur un sol tropical et à des valeurs de pH supérieures à 7,5 où le phosphate naturel ne se dissout pas directement (Mishra et al., 1996).

1.7.3. Utilisation des phosphates naturels de la région

Il existe dans la sous-région des gisements de phosphates naturels. Les phosphates naturels de Tahoua et du parc W (Niger), Kodjari (Burkina Faso) et Tilemsi (Mali) ont été plus particulièrement étudiés. L'application directe des phosphates naturels de la région peut être une solution économique pour remplacer les engrais importés coûteux (Kasawnek et al., 1978), mais leur efficacité dépend de leur composition chimique et minéralogique, qui peut être très variable, ainsi que des paramètres pédologiques et des systèmes de culture (Chien et al., 1978).

1.7.3.1 Le phosphate naturel de Tahoua

Au Niger ; les phosphates du parc W et ceux de Tahoua présentent respectivement une efficacité égale à 48 et 76% de celle du superphosphate simple, illustrant l'intérêt de l'application directe des phosphates naturels de Tahoua (Bationo et al., 1990). Le phosphate naturel de Tahoua est un phosphate sédimentaire de type nodulaire. Selon Michel, (1971) la colonne stratigraphique de la zone comprend :

- une série calcaire : cet ensemble est constitué de bancs de calcaires massifs, de marnes et d'argiles calcaires ;
- une série argileuse : constituée principalement d'argiles schisteuses et c'est dans cette partie que l'on trouve les nodules de phosphates ;
- le continental terminal ; constitué de grès argileux du moyen Niger, de la série argilo-sableuse à lignites et de la série sidérolithique de l'Adrar Doutchi ;
- les formations superficielles : comprennent les dunes, les sables, les alluvions, les colluvions, les argiles sableuses et les latérites.

Des travaux ont montré que les phosphates naturels de Tahoua (PNT) sont plus efficaces que ceux de Kodjari (PNK), aussi bien pour le mil que pour le niébé (Bationo et al., 1998). La faible efficacité des phosphates naturels par rapport au superphosphate simple résulte généralement de leur faible solubilité dans l'eau. L'acidification partielle des phosphates naturels permet d'améliorer leur solubilité et leur efficacité agronomique. Au Niger, une fois la fertilité des sols restaurée par l'application du phosphate naturel de Tahoua, l'addition au poquet de l'équivalent de 3kg/ha de superphosphate simple permet d'obtenir les rapports bénéfiques / couts les plus élevés par rapport à la dose traditionnellement recommandée de 13Kg/ha de superphosphate (Bationo, 1998). Hammond et al.,(1986) et Schultz (1986) ont montré que le coût global de l'opération (achat + traitement) est inférieur au cout de l'achat des engrais commerciaux conventionnels.

1.7.3.2. Contraintes liées à l'utilisation du phosphate naturel

La plus part des paysans du sahel ne sont pas propriétaires de leurs terres et ne veulent donc pas investir pour les améliorer à long terme puisqu'ils ne sont pas sûrs de pouvoir continuer à en profiter (Pieri et al, 1998). Un investissement en capital dans le sol doit être effectué une fois, et rapporter pendant plusieurs années. Les paysans pauvres n'ont pas le plus souvent pas les moyens financiers d'effectuer des tels investissements, et les banques ne veulent pas leur accorder de prêts du fait des faibles garanties qu'ils peuvent offrir. La taille de l'exploitation peut avoir différents effets sur le taux d'adoption de nouvelles technologies telles que l'utilisation de PN en fonction des caractéristiques de la technologie et de la structure institutionnelle.

1.8. Généralités sur la culture du mil

1.8.1. Origine et répartition géographique

Le mil à chandelle a été domestiqué au Sahel il y a 4000–5000 ans à partir de *Pennisetum violaceum* (Lam.) Rich (Andrews et Kumar, 2006). Il s'est répandu jusqu'en Afrique de l'Est et de là, à l'Afrique australe, puis au subcontinent indien, il y a environ 3000 ans. Il a atteint l'Amérique tropicale au XVIII^e siècle, et les Etats-Unis d'Amérique au XIX^e. En Afrique, la culture du mil est pratiquée dans un grand nombre de pays, notamment au Nigeria (40%) de la production régionale, au Niger, au Burkina Faso, au Mali, au Sénégal et au Soudan (Tableau 1).

Tableau 1 : Classement des 10 pays producteurs du mil (FAO, 2012).

Classement	Pays	Production (MT)
1	Inde	8,000,000
2	Nigeria	6,100,000
3	Niger	2,500,000
4	Chine	2,200,000

5	Burkina Faso	1,250,000
6	Russia	1,050,000
7	Mali	815,000
8	Soudan	784,000
9	Sénégal	628,426
10	Ouganda	584,000

1.8.2. Aspects botaniques

Systematique

Parmi les divers noms du mil issues de la taxonomie, la dénomination *pennisetum glaucum* (L.) R.Br., est la plus ancienne et la plus utilisée par les institutions de recherche sur le mil. Le genre *pennisetum* comprend environ 140 espèces, dont leur spécificité est la présence d'involucres à soies libres. Le mil appartient à la classification taxinomique suivante :

- Règne Végétale
- Classe des Monocotylédones
- Ordre des Poales
- Famille des Poaceae (Gramineae)
- Sous-Famille des Panicoideae
- Tribu des Paniceae
- Genre : Pennisetum
- Espèces : Glaucum ou Thypoides

1.8.3. Caractéristiques morphologiques

Le mil (*Pennisetum glaucum* [L.] R.Br) est une graminée à port érigé dont la hauteur de la plante varie entre 1 et 3 m, selon les variétés ((Rachie et Majmoudar, 1980 ; Diop, 1999). Cependant, dans la zone semi-aride, la hauteur de la tige ne dépasse pas 300 à 380 cm, et possède un diamètre de 1 à 2 cm (Zongo et al., 1988 ; Amadou, 1994). Le système racinaire est composé de racines superficielles et des racines qui peuvent s'enfoncer jusqu'à 200 cm dans le sol, ce qui explique l'adaptation de cette plante aux sols dunaires (Boubacar, 1985 ; Sivakumar et Salaam, 1994 ; Alhassane, 2009). La tige est rigide et présente des entre-nœuds pleins dont ceux de la base sont les plus courts. Les nœuds de la base sont capables de donner des talles primaires, secondaires et tertiaires. Les talles ne sont pas toutes fertiles : 1 à 7 talles par plante parviennent généralement à produire des épis.

Les feuilles alternes engainantes et à nervures parallèles d'insèrent sur la tige au niveau des nœuds. Elles possèdent une gaine enserrant la tige et un limbe lancéolé. Les nervures sont bien développées et empêchent au limbe de se plier. Le limbe porte des stomates sur ses deux faces (Denis, 1984). Le système racinaire est concentré dans les trente premiers centimètres du sol, mais certaines racines peuvent descendre jusqu'à trois mètres de profondeur. Les feuilles ont une longueur variant de 20 à 100 cm pour une largeur variant entre 5 et 50 cm. La longueur de l'épi (ou chandelle) varie de 10 cm à plus de 100 cm (Mémento de l'agronome 2002). Le fruit (sous-forme de grain) est un caryopse (de forme globuleuse à elliptique) long d'environ 4 mm et de couleur variable (blanchâtre, jaunâtre ou grisâtre). Les graines de mil sont densément réparties sur l'épi (Denis, 1984).

1.8.4. Cycle végétatif

Le mil est une plante annuelle dont le cycle de croissance peut être divisé en trois phases : la phase végétative, la phase reproductive et la phase de remplissage des grains.

1.8.4.1 phases végétatives

La phase végétative, pouvant aller de 0 à plus 50 jours après le semis (JAS), débute lors de l'émergence de la plantule et se poursuit jusqu'à l'initiation de la panicule. La germination du mil est hypogée et se produit environ 48 heures après le semis si les conditions sont favorables. La levée a lieu avec l'apparition de la première feuille, 4 à 5 JAS. A la fin de la levée, les bourgeons de toutes les feuilles sont apparus et chez les variétés précoces, 6 à 7 feuilles sont déjà développées (Maiti et Bidinger, 1981).

La plantule développe son système racinaire primaire et forme de nombreuses racines adventives. Le tallage débute autour de 15 jours après la levée et se poursuit durant 10 à 20 jours chez les variétés précoces. Il est généralement plus long chez les variétés semi-tardives, tout en restant lié à la date de semis chez les variétés photosensibles. Les talles produites tardivement ne forment généralement pas d'épis ; même si elles en donnent, ceux-ci parviennent rarement à la maturité. Pendant la phase active du tallage, la taille de la plante reste réduite (plante en rosette), du fait que l'allongement des entre-nœuds n'est pas encore entamé. Durant la phase végétative, l'accumulation de biomasse concerne essentiellement les feuilles et les racines.

Elle peut aussi concerner les tiges notamment en cas d'un semis précoce d'une variété photosensible. L'initiation de la panicule est marquée par l'élongation dôme apical et permet l'entrée dans la phase suivante.

1.8.4.2 Phase reproductrice

La phase reproductrice s'observe souvent aux alentours du 50^{ème} au 75^{ème} JAS. Elle commence avec l'initiation paniculaire et marque souvent le début de la montaison, c'est-à-dire des entre-nœuds des tiges à partir de la base. Les talles entament la montaison de la même manière que la tige principale, mais avec un certain décalage dans le temps. Pendant la

phase reproductrice, l'accumulation de la biomasse concerne les tiges et les panicules, en plus des racines et des feuilles. La panicule développe des épillets sur lesquels émergent des fleurs mâles et femelles et après fécondation des graines. La floraison a lieu deux à trois jours après l'apparition effective de la panicule. Les fleurs femelles s'épanouissent avant les mâles et leur apparition se fait progressivement du sommet de la panicule à la base. Cinq à six jours plus tard, la floraison et la fécondation de la panicule sont terminées (Maiti et Bidinger, 1981).

1.8.4.3 Phase de remplissage des grains

Cette phase commence après la fécondation des fleurs de l'inflorescence principale, à partir du 75^{ème} JAS chez les variétés précoces et semi-tardives. Elle peut intervenir avant cette date chez les variétés ultra précoces et se poursuit jusqu'à la maturité totale des épis (épis de la tige principale et des talles). Pendant cette phase, l'accumulation de biomasse concerne surtout les caryopses ainsi que les feuilles et les tiges des talles susceptibles de produire des épis.

L'accumulation de la biomasse des grains (et remplissage des grains) se fait souvent au détriment des feuilles plus âgés et des jeunes talles non productives qui se dessèchent par sénescence. La sénescence des feuilles se poursuit jusqu'aux 2 ou 3 dernières feuilles, vers le sommet de la tige. Les grains traversent une phase laiteuse, une phase cirreuse ou vitreuse avant de parvenir à la maturité physiologique, environ 20 à 25 jours après la floraison selon les variétés (Maiti et Bidinger, 1981).

1.8.5 Variété cultivées

Les variétés de mil cultivées se répartissent généralement en variétés à cycle végétatif court ou variétés hâtives et en variétés à cycle long ou variétés tardives. Le Niger qui est un centre de diversification, possède plusieurs variétés de ces deux grands groupes :

- ✓ Les mils tardifs (120 à 130 jours) : Maiwa ou Sommo, photosensibles, ils fleurissent en fin septembre dans les conditions du Niger. Ils sont surtout cultivés dans la partie sud du pays où la pluviosité est généralement suffisante pour leur permettre d'accomplir leur cycle de développement. Leur contribution dans la production globale est inférieure à 10% (Jika et al, 1985).
- ✓ Les mils précoces (cycle 80 à 95 jours): Tamangaji, Ankoutess, Ba angouré, Zongo, Batoukouché, Boudouma, Hainikirey, Gerguera, P3 Kollo, HKP ils sont cultivés dans les zones à faible pluviosité, sont peu sensibles à la photopériode, et fleurissent aux environs de 60 jours après le semis. La majeure partie de la production de mil du pays (90 à 92%) provient des variétés de ce groupe ; leur cycle cadre bien avec la durée de la saison des pluies.

Les variétés améliorées mises au point par l'INRAN et actuellement vulgarisées ou en pré vulgarisation au Niger peuvent être classées en groupe à cycle intermédiaire (86 à 95 jours) et groupe à cycle court (80 à 85 jours).

Dans les systèmes de culture, le mil est généralement en association avec d'autres céréales comme le sorgho et le maïs ou avec des légumineuses comme l'arachide et le niébé. L'association mil-niébé ou sorgho-niébé est prédominante au sahel.

1.8.6. Ecologie du mil

Le mil est une plante herbacée annuelle des zones semi-arides chaudes. IL est généralement cultivé dans les zones ayant une pluviométrie variant de 200 à 800 mm repartis sur 3 à 5 mois, selon les zones agro-écologiques de la bande cultivable du Niger (Bouzou, 2009). Le mil est adapté aux contraintes du milieu sahélien. Il a une forte aptitude à mettre en place des mécanismes physiologiques des tolérances à la sécheresse: ralentissement des pertes en eau au niveau des feuilles supérieures, maintien d'un niveau hydrique favorable au bon remplissage des grains (Winkel et Do, 1992). Moins exigeant que le sorgho, le mil est une céréale qui est généralement adaptée aux sols sableux légers et sablo argileux bien drainé avec un Ph faible. Il est plus tolérant à la sécheresse et réussit mieux sur des sols à faible niveau de fertilité et sous des températures relativement élevée.

1.8.7 Importance du mil

Le mil est une plante céréalière cultivée surtout pour ces grains qui sont essentiellement utilisés (à 80-90%) pour l'alimentation humaine au Sahel (Abdoussallam, 2002). Ses sous-produits, telles que les tiges et les feuilles, sont utilisées dans la construction des habitations, des palissades, des enclos, greniers. Ils sont également utilisés comme fourrage vert ou en ensilage, pour la fabrication du fumier et du compost. Le mil est fortement utilisé pour la consommation humaine. Il sert aussi dans l'industrie agro-alimentaire (biscuiterie, pâtes alimentaires, boissons alcoolisées, etc.).Le mil représente environ 75 % de la consommation totale de céréales cultivées au Niger. Il est cuisiné en bouillies, en pâte communément appelée tô, en couscous, en galettes, etc. La teneur en protéines des grains du mil est comparable à celle du blé, de l'orge et du maïs (Bouzou, 2009). C'est un aliment énergétique, nutritif, particulièrement recommandé pour les enfants et les personnes âgées ou en convalescence. Le grain de mil contient environ 10,6% de protéines ; 5,1% de lipides ; 66,7% d'amidon ; 1,3% de fibres brutes et 1,9% d'éléments minéraux (ROCAFRIMI, 2002). L'apport en vitamines du grain de mil est également appréciable.

Ainsi, il contient environ 0,22 mg de vitamines A par 100 g de graines (Yahaya, 1999). Le mil pénicillaire compte pour près de la moitié de la production mondiale du mil. C'est l'espèce la plus importante du point de vue des superficies cultivées et de la sécurité alimentaire, car dans plusieurs régions d'Afrique et d'Asie c'est l'une des rares cultures qu'on peut produire. Chacune des espèces ont des caractéristiques physiques, une qualité de grain, des besoins édaphiques et climatiques, ainsi que des cycles de croissance qui leur sont propres Selon cette

même institution, les pays en développement surtout en Afrique et en Asie produisent 94% de la production mondiale du mil qui est estimée en moyenne à 28 millions de tonnes.

1.8.8. Exigence pédoclimatique

Besoins en sol

Le mil est une plante rustique, peu exigeante du point de vue de la fertilité, mais sensible au type de sol. Les sols recommandés pour la culture du mil sont généralement à texture grossière. Ils doivent être légers, sableux (surtout dunaires sans forte proportion d'argile). Ainsi, les meilleurs terrains à mil sont sableux ou argilo-sableux, un peu humifères, à pH légèrement acide et contenant de l'azote et de la potasse (Yahaya, 2009). Le mil préfère les sols profonds, aérés, peu compacts et bien drainés. Il redoute l'eau stagnante et souffre des excès d'eau, notamment dans les bas-fonds. Le mil talle peu ou pas du tout sur les sols durs, les sols lourds et dégradés (Yahaya, 2009).

Dans le Sahel, le mil est cultivé généralement sur des sols sableux profonds, rouges (sols ferrugineux tropicaux peu lessivés), contenant plus de 65% de sable et moins de 18% d'argile (Swindale, 1982). Pour ce qui est des sols sableux du domaine expérimental du Centre Régional AGRYMET, ils sont pauvres en phosphore et en azote (Denis et al., 1984). Selon ces auteurs, ces sols contiennent souvent moins de 0,25% de matières organiques et leurs capacités d'échanges cationiques sont très faibles.

Besoins en chaleur

Le mil est exigeant en température et redoute le froid humide (Yahaya, 2009). Le zéro de végétation est de 11 °C environ. La température optimale est de 30 à 33 °C (27 à 30 °C selon d'autres sources) et la température maximale est de 38 à 40 °C. Le mil résiste aux températures élevées même durant les périodes de sécheresse (Yahaya, 2009).

Besoins en lumière

Le mil est une plante héliophile (qui exige l'éclairement solaire direct) chez laquelle la lumière joue un rôle déterminant, aussi bien dans les processus morphogénétiques de sa croissance que sur le déterminisme de sa floraison. En effet, la durée de l'insolation ou photopériode constitue une véritable source de variabilité de la date de floraison des variétés photosensibles (Alagarswamy et Swaminathan, 1998 ; Alhassane, 2009).

Besoins en eau et en élément fertilisant

La disponibilité en eau est le facteur décisif pour le succès de la culture du mil au Sahel (Bley, 1990). Plusieurs études ont montré qu'une insuffisance hydrique en fin de cycle peut réduire ou même annuler les effets positifs des techniques d'augmentation des rendements du mil telle que l'application des fertilisants azotés (Donald et Hamblin, 1976; Alhassane et al., 2006 et 2008), le travail du sol (Chopart et Koné, 1994), ou l'utilisation des variétés améliorées (Vaksmann et al., 1996). Une pluviométrie de 350 mm, bien répartie sur 75 jours au minimum, peut assurer une récolte de mil satisfaisante. Le rendement diminue aussi quand la pluie devient trop excessive (Yahaya, 2009). Les besoins en fumure organique est de

15 à 20 Tonnes de fumier à l'hectare qui sera enfouis lors de la préparation du sol (labour). La fumure minérale est essentiellement apportée par l'azote qui est le pivot de la fumure du mil. On estime qu'il faut apporter une fumure d'entretien de 100kg/ha de N (urée). C'est azote n'est complètement valorisé que si les quantités de phosphore et de potassium disponibles pour la plante sont suffisantes. Elles sont apportées par le NPK (15-15-15) avant la préparation du sol ou être épandu au semis dans le cas échéant.

1.8.9. Opérations culturales

Malgré sa rusticité, la culture du mil exige un minimum de soins culturaux comme le démariage précoce, le sarclage régulier, et l'apport de fertilisants. On rencontre les techniques suivantes dans le calendrier cultural :

1.8.9.1 Préparation du sol

Elle peut se faire dès les premières pluies, par un labour à plat (avant semis). Le mil répond bien au labour, avec une augmentation de rendement de 50 à 100%. A défaut, un scarifiage est suffisant. Sur sol sableux, le mil a une exigence très faible le type de travail du sol. Ainsi, un grattage simple permet d'obtenir des niveaux de rendement acceptables. Il vaut mieux labourer les sols sablo-argileux plus compacts pour améliorer l'infiltration de l'eau de pluie et leur aération. Dans les zones inondables, cette préparation du sol devra être complétée par un billonnage.

1.8.9.2 Semis

Au Niger, les paysans font les semis du mil dès la première pluie utile (à partir de 15 à 20mm). Toute fois la date de semis est un paramètre très important qui conditionne souvent la réussite de la culture. Souvent les cultivateurs font les semis en sec ; il est conseillé à ce moment de traiter les semences avec un fongicide et de faire les semis à partir de mi-mai, dans la zone sahélienne.

En culture traditionnelle, les semis sont effectués à la grande daba en poquets alignés.

En culture modernisée, les techniques de semis sont plus rapides mais souvent pas efficaces. On utilise des semoirs à traction asine ou bovine. Dans ce cas, les semis se font en lignes continues. Le mil peut se multiplier par semis direct des grains ou par transplantation des jeunes plants. (Denis, 1984).

1.8.9.3 Entretien

Dans la première quinzaine qui suit le semis et jusqu'à la fin de la culture, les opérations suivantes sont réalisées en vue d'optimiser le rendement. Il s'agit du :

- Remplacement des poquets manquants par ré-semis ;
- Démariage des plants ;
- Sarclages.

1.9. Production du mil au Niger

La zone utile de production agricole s'étend de la frontière sud à l'isohyète 250 mm. Dans cette bande de terre relativement large, le mil représente environ 75% de la consommation totale de céréales. Parmi les pays producteurs du mil, seuls le Niger et le Nigeria cultivent toutes les diversités de mil sur une grande superficie avec une production à grande échelle en Afrique de l'Ouest. La superficie cultivée est presque la même pour les deux pays, mais le volume de production au Nigeria est environ 3 fois supérieur à celui du Niger (Alzuma, 1990). Le sous-secteur agricole, demeure la source presque exclusive des aliments et nutriments consommés par les nigériens. Malheureusement, la forte sensibilité des activités agropastorales aux risques climatiques, écologiques, économiques et même sociaux fait que le pays n'arrive pas toujours à assurer une alimentation saine et suffisante à l'ensemble de la population, en tout en et en tout lieu.

Le Niger enregistre régulièrement des déficits céréaliers qui ne sont couverts que par les importations à partir du marché régional ou international et des déficits fourragers qui ne sont compensés que par la transhumance transfrontalière. La production du mil est peu intensive ; elle est généralement cultivée sur des sols pauvres. Le rendement à l'hectare est très faible 300 à 400 kg/ha (tableau 2).

Le pays est ainsi régulièrement touché par des famines. Une année sur deux, on enregistre un fort déficit compris entre 200 000 et 600 000 tonnes de céréales (DS/MAG, 2011).

Tableau 2: Données sur la production du mil de 2003 à 2012 au Niger

Mil			
Campagne	Superficie (ha)	Production (kg/ha)	Rendement(T)
2003	5 771 293	2 744 908	476
2004	5 604 355	2 037 714	364
2005	5 893 929	2 652 391	450
2006	6 229 948	3 008 584	483
2007	6 170 179	2 781 928	451
2008	6 828	3 388 988	496
2009	6 513 144	2 677 855	411
2010	1 254 570	759 232	605
2011	1 192 713	552 796	463
2012	7 095 105	3 862 155	544

(Source : DSA/MAG/2012)

1.9.1. Contrainte liée à la production du mil au Niger

Au sahel en général et au Niger en particulier, les contraintes à la production du mil sont multiples et variées et concernent essentiellement les contraintes socio-économique, les contraintes abiotique ou environnementales (sol, eau, éléments nutritifs) et les contraintes biotiques (maladies, insectes, adventices).

1.9.1.1. Contraintes socio-économiques

Dans les pays sahéliens, la pauvreté, l'insécurité alimentaire compromettent la génération et l'adoption de nouvelles technologies. Dans la plupart de ces pays, les fortes croissances démographiques vont de pair avec une faible productivité agricole. Généralement, le bas niveau des revenus limite la capacité des producteurs à investir dans les nouvelles technologies. Les contraintes socio-économiques se résument essentiellement au faible pouvoir d'achat des producteurs, à l'inadéquation entre le prix des intrants agricoles et celui du mil et aux difficultés d'accès aux équipements et aux crédits agricoles qui limitent l'adoption de nouvelles technologies de production. L'insuffisance des unités de transformation limite les possibilités d'un pilotage de la filière par l'aval.

Dans les pays sahéliens où l'augmentation de la production est plus fonction de l'accroissement des superficies que de l'intensification de l'agriculture, la politique et les stratégies mises en œuvre pour l'approvisionnement des producteurs en équipements et intrants agricoles constituent une composante essentielle du développement économique.

La problématique de l'approvisionnement du monde rural en équipements et intrants agricoles se pose à la fois en termes de disponibilité au moment opportun et leur coût trop élevé par rapport au prix des céréales comme le mil. Aussi la fragilité de la plupart des terres de culture du mil combinée à la mauvaise utilisation des équipements et intrants agricoles accélèrent la dégradation des superficies emblavées en les exposant à l'érosion hydrique et éolienne.

1.9.1.2. Contraintes abiotiques ou environnementales

Elles portent essentiellement sur les contraintes édaphiques et climatiques. Les contraintes édaphiques ou contraintes liées au sol concernent la pauvreté des sols en éléments fertilisants (N et P), une faible teneur en matière organique, une acidité prononcée et une faible capacité d'échange cationique. Les pressions sur les terres agricoles pluviales des pays sahéliens augmentent avec l'augmentation de la double demande en nourriture et en fourrage.

Ces pressions résultent à la fois de la poussée démographique et une augmentation du cheptel et de l'utilisation de plus en plus croissante de la traction animale dans les exploitations agricoles. Le mil est cultivé, au Niger, majoritairement sur des sols sableux pauvres en matières organiques avec une teneur variante entre 1 et 1,5% en éléments fertilisants

(phosphate, azote) (Michel et *al.*, 2000) d'une part, et d'autre part sur des sols à faible capacité de rétention en eau. Selon Bationo et al. (1991), la fertilité des sols en zone sahélienne dépend surtout de la disponibilité en phosphore et en éléments organiques dans le sol.

Les ressources naturelles (sol, eau, nutriments) restent les mêmes, mais l'amélioration de la gestion devient de plus en plus un passage obligé si nous devons inverser la dégradation des ressources naturelles et développer un système de production durable pour les exploitations agricoles des communautés rurales. La reconnaissance croissante de la pauvreté des sols comme le principal facteur limitant la production des cultures chez les fermiers des pays sahéliens suscite un intérêt dans l'utilisation des données provenant des études de fertilisation passées pour identifier des options susceptibles d'améliorer la production agricole (Bekunda et *al.*, 1999).

Les facteurs climatiques sont essentiellement dominés par les pluies, les vents et les températures. Dans le Sahel, l'irrégularité des pluies, la faiblesse des hauteurs recueillies, leur mauvaise répartition dans le temps et dans l'espace et une forte évaporation constituent l'un des facteurs limitant la production agricole. Dans ces zones sahéliennes, la pluviométrie a une incidence notable sur le potentiel productif des cultures. Les faibles ressources en eau peuvent être valorisées par des pratiques culturales appropriées. En effet, la bonne couverture végétale constitue une composante essentielle dans la réduction de l'évaporation d'eau du sol des surfaces nues. Par exemple, les cultures associées avec des légumineuses comme le niébé permettent de mieux valoriser les ressources en eau par une bonne couverture du sol par la légumineuse.

1.9.1.3. Contraintes biotiques

Les contraintes biotiques qui occasionnent des pertes substantielles de rendement concernent les maladies, les insectes, les adventices et le faible potentiel productif des variétés locales. Le mildiou ou maladie de l'épi vert causé par un champignon *Sclerospora graminicola* et le charbon causé par *Tolyposporium penicillariae* constituent les principales maladies du mil dans la zone sahélienne de l'Afrique de l'Ouest. Le mildiou est de loin la maladie la plus fréquente et la plus répandue dans les zones de production du mil. Les pertes de rendement occasionnées par cette maladie sont estimées entre 20 et 30% (ROCAFREMI, 2002).

Les chenilles mineuses de tige et surtout celles des chandelles sont des ravageurs importants du mil dans les zones sahéliennes. Dans ces zones, le complexe des insectes du mil est dominé par la chenille mineuse d'épis *Heliocheilus albipunctella* De Joanis le plus largement réparti dans le Sahel (Bhatnagar, 1987 ; Ndoye et *al.*, 1989). Elle occasionnerait 10 à 20% de

pertes, voire une perte quasi totale des récoltes (Gahukar et *al.*, 1986). Elle est suivie par *Coniesta ignefusalis* Hmps.

Les adventices occasionnent des pertes de rendement de l'ordre de 30% dans les pays en voie de développement (Lagoke et *al.*, 1988). Le fermier africain utilise environ 40 % de son temps à l'entretien des parcelles alors que le fermier des pays industrialisés utilise moins de 10 % de son temps pour contrôler les adventices (Lagoke et *al.* 1988). L'utilisation des herbicides qui a fait ses preuves dans les pays industrialisés constitue une stratégie de lutte acceptable seulement dans les systèmes d'exploitation basés sur des cultures de rentes. L'inadéquation entre le prix du mil et celui des herbicides limite l'utilisation des pesticides dans les systèmes de culture à base de mil.

Le problème du *Striga* comme adventice est spécifique en ce sens qu'il constitue une contrainte majeure à la production du mil même dans un champ propre selon le degré de pauvreté et d'utilisation des parcelles et aussi compte tenu de son degré d'association avec la culture hôte. Les pertes de rendement dues au *Striga hermonthica* sont estimées entre 1 et 80 % selon le degré d'infestation des parcelles (Konaté, 1986). D'autres part, les oiseaux granivores comme *Quelea quelea* L. et *Passer luteus* Lichtenstein attaquent le mil surtout au stade pâteux et parfois même au stade laiteux et peuvent occasionner des pertes en grains sévères, surtout si la récolte est retardée par rapport à la maturité des grains.

Chapitre II. Matériels et méthodes

2.1 Matériel

2.1.1 Site expérimental

2.1.1.1 Localisation géographique

L'essai a été conduit sur les parcelles expérimentales de la faculté d'Agronomie de l'université Abdou Moumouni de Niamey situées sur la latitude $13^{\circ}29'57''6$ Nord et la longitude $2^{\circ}05'24''2$ Est.

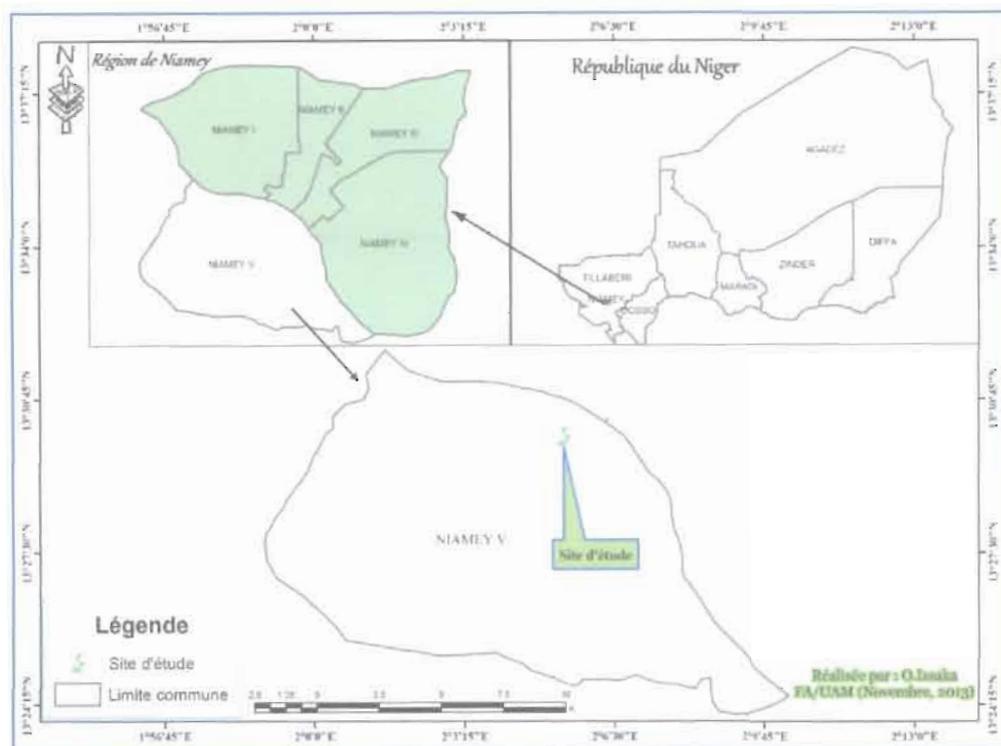


Figure 1: Localisation de la zone d'étude (Niamey commune V)

2.1.1.2 Climat

Pluviométries

La campagne pluvieuse 2012 -2013 (l'année de l'essai) a été marquée par des poches de sécheresse. Ainsi la pluviométrie enregistrée sur le site a été non seulement insuffisante mais aussi mal répartie. La pluviométrie enregistrée de Mai à Septembre est de 365,3 mm en 37 jours. La figure 2 présente la variation en décades de la pluviométrie du site expérimental durant la campagne 2013.

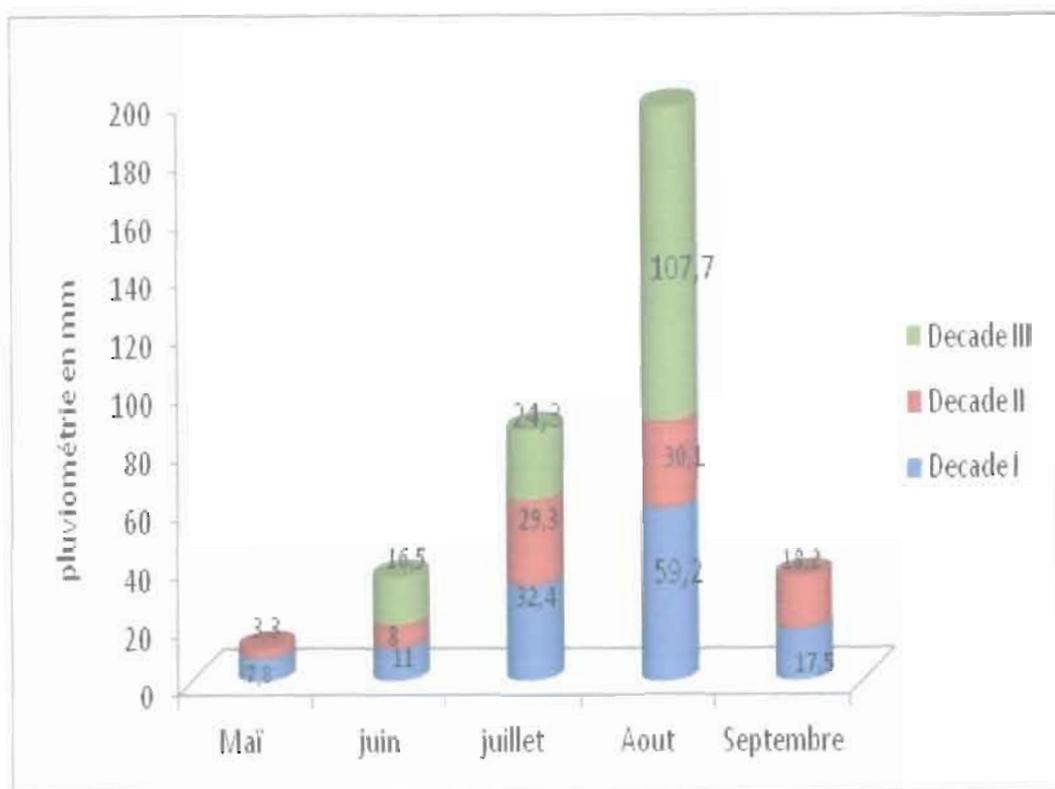


Figure 2: Cumuls décadaires de la pluviométrie du site expérimental, saison pluvieuse 2013.

2.1.1.3 Le sol

Le sol du site expérimental est de texture sableuse ; ont un pH neutre et sont pauvre en matière organique.

2.1.1.4. Végétation

Le site expérimental est aussi caractérisé par une végétation pérenne à dominance de *Balanites aegyptiaca*, *Hyphaene thebaica*, *Acacia senegal* et *Calotropis procera*.

Les espèces herbacées rencontrées sont entre autres : *Corchorus faxicularis*, *Corchorus tridens*, *Waltheria indica*, *Phyllanthus pentandrus*, *Gomphrena celosioides*, *Polycarpus corymbosa*, *Phylanthus pentandrus*, *Sida corymbosa*, *Borreria araticularus*, *Alysicarpus ovalifolius*, *Scilla sudanica* et *Eragrotis tremulla*.

2.1.2 Le matériel végétal

La variété de mil choisie est le Haïni Kiré Précoc (HKP), a cycle moyen de 90 jours. C'est une variété mise au point par l'IRAT en 1974 et qui résulte de la recombinaison des lignes S3 les plus précoces à partir du cultivar Haïni Kiré originaire de la région de Téra. La hauteur de la tige varie entre 1,9 et 2 m. Ses graines sont de forme ovale et de couleur brun jaune. En bonne condition de culture la variété HKP à un rendement potentiel de 2t/ha et sa zone

préférentielle de culture se situe entre les isohyètes 350 et 500 mm. Les talles sont de 4 par plante. La variété HKB est résistante aux ennemis et sensible au charbon et au mildiou. La forme de l'épi est cylindrique, elle est longue 0,5 -0,70 m. La graine est de couleur Brun-jaune, de forme ovale. Le Poids de 1000 graines est de 9 à 10 grammes. Comme pour la plus part des autres variétés de mil, il a été recommandé pour la variété HKB ce qui suit :

- ✓ Une densité de 10000 poquets/ha ;
- ✓ Un semis après une pluie utile (20mm) ;
- ✓ Un démariage à 3 plants 2 à 3 semaines après le semis ;
- ✓ Sarclage à la demande. (INRAN, 1994).

Fiche technique du mil HKP

Techniques culturales

Choix de Terrain et Préparation du Sol

Le mil préfère des sols légers riches en matière organique. La préparation du lit de semis nécessite :

- Apport de 3 à 5 tonnes de matière organique décomposée à l'hectare.
- Scarifiage au moyen d'un cultivateur canadien (3 ou 5 dents) à la suite des premières pluies pour enfouir la matière organique.

Semis et fumure de fond

- Le semis peut s'associer à la micro dose d'engrais minéral à 6 g/poquet (60 kg/ha) pour le 15-15-15 et 2 g/poquet (20 kg/ha) pour le DAP pour une **densité de 10000 poquets/ha**
- La période optimale de semis couvre les trois décades de juin.
- Les écartements correspondant à la densité ci-dessus sont de **100 cm x 100 cm**.

Entretien de la culture

Au moins deux sarclo-binages sont nécessaires.

- Le premier avec démariage à trois plants par poquet au plus tard, deux semaines après le semis;
- le deuxième sarclo-binage deux ou trois semaines après le premier.

Une fumure de couverture en urée est apportée en deux fois localisée au poquet :

- Zone sud: 50 kg/ha au tallage et 50 kg/ha à la montaison.
- Zone intermédiaire: 25 kg/ha au tallage et 25 kg/ha à la montaison.

HKP

DÉNOMINATION:	Hāini Kiré Précoce
NATURE GÉNÉTIQUE:	Population sélectionnée
OBTENTEUR ET DATE D'OBTENTION:	INRAN, 1978
PAYS ET DATE D'INSCRIPTION:	Niger, 1980
MAINTENEUR:	INRAN
ZONE DE PRODUCTION:	350-800 mm
CYCLE SEMIS –MATURITÉ (50%):	75-90 jours
HAUTEUR DE PLANTES À MATURITÉ:	190-200 cm
APTITUDE AU TALLAGE:	Moyenne
LONGUEUR DE LA CHANDELLE:	Intermédiaire
POIDS DE 1000 GRAINS:	9-11 grammes
RENDEMENT POTENTIEL:	1,5 à 2,5 t/ha
AUTRES CARACTÈRES:	Légèrement sensible à la photopériode, Sensible au charbon et au mildiou, Peu sensible à la mineuse de l'épi.

Source DGA/MAG/2010)

2.1.3 Matériel technique

Le matériel technique utilisé était composé d'un mètre ruban gradué pour la mesure des dimensions de l'essai, de dabas traditionnelles pour le labour, des étiquettes pour la distinction des variétés, des balances mécaniques et électroniques pour les différentes mesures de poids, la tarière pour la collecte des échantillons du sol, GPS, des boîtes pour le dosage du phospho-compost, des sachets plastiques pour la conservation des échantillons, des marqueurs, piquets et cordes.

2.1.4 Fertilisation

Le phospho-compost a été utilisé comme fertilisant photo 1.

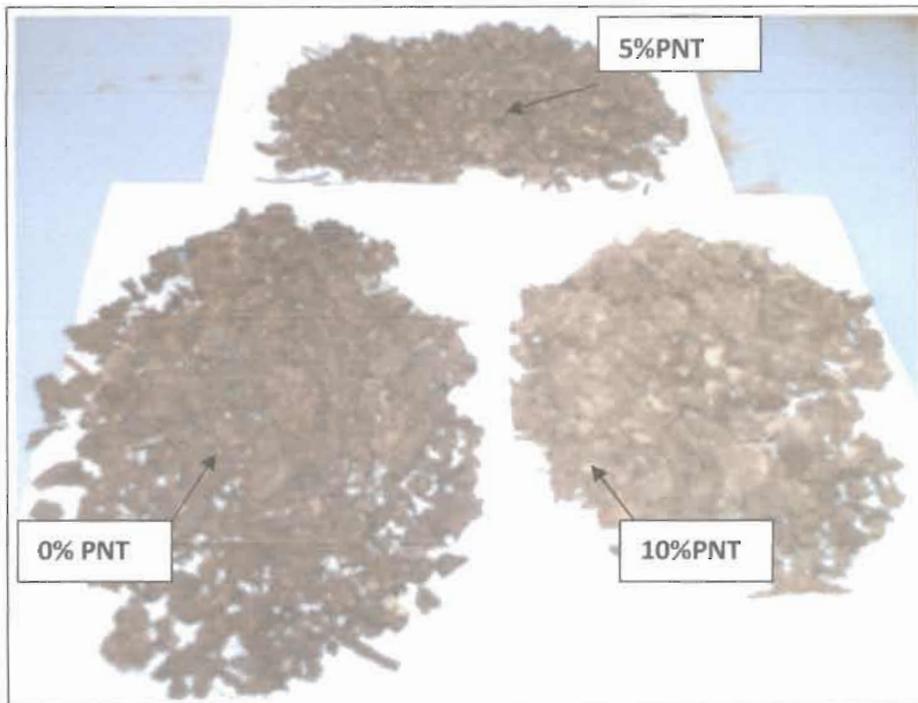


Photo 1: Echantillons du phospho-compost

2.2 .Méthodes

2.2.1. Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental utilisé est un bloc complètement randomisé avec 4 traitements répétés 3 fois (figure 3.) Chaque bloc est composé de 12 parcelles de 5 m x 4 m chacune espacées entre elles de 3m, et de 5m entre blocs. La superficie de l'ensemble du dispositif se présente comme suit : 81m x 25m soit une superficie totale de 2025 m² présentant un même type de sol (texture sablo limoneux).

Les traitements se présentent comme suit :

1. Témoin (T0) correspond au contrôle absolu sans apport. Il reflète encore la situation de la majorité des cas chez les agriculteurs Nigériens.
2. Phospho-compost 1 (PC1), composé de 1/3 de bouse de vache+1/3 de tige de mil+1/3 de jacinthe d'eau (MO), appliqué à raison de 1t/ha ;
3. Phospho-compost 2 (PC2)= 95% MO +5% PNT, appliqué à raison de 1t/ha ;
4. Phospho-compost 3 (PC3)= 90% MO+10% PNT, appliqué à raison de 1t/ha.

Le phospho-compost (PC) devrait être appliqué avant le semis et incorporé dans le sol de façon à couvrir le plus possible la rhizosphère et aussi après la levée. Mais pour cause de quantité insuffisante, le phospho-compost a été appliqué seulement après la levée.

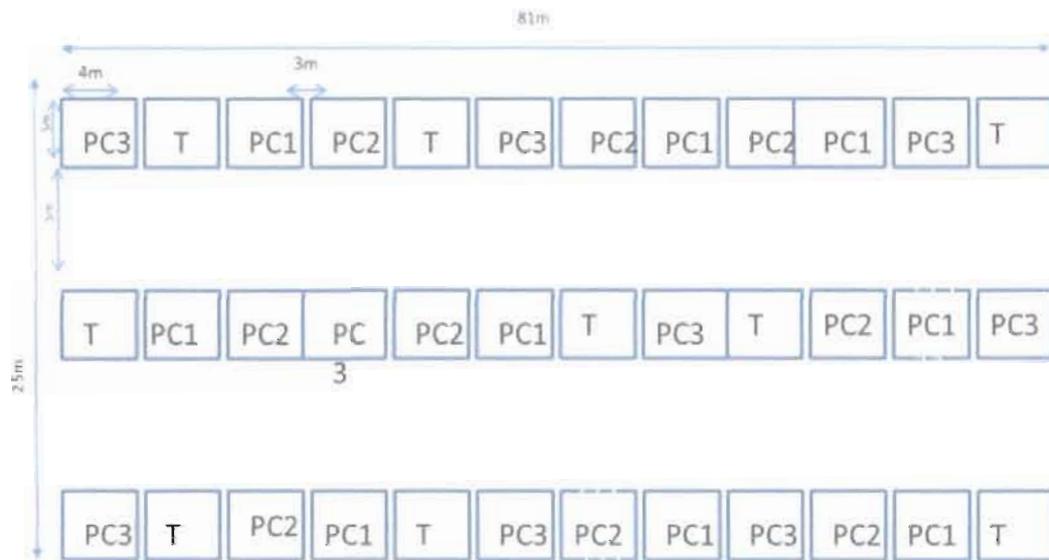


Figure 3: Dispositif expérimental de l'essai.

2.2.2. Méthodes d'analyse des sols

2.2.2.1. Échantillonnage du sol

Les échantillons de sol ont été prélevés avant le piquage pour la caractérisation des paramètres physico-chimiques. Au total, 10 échantillons ont été prélevés dans l'horizon 0-20 cm et 20-40 cm à l'aide d'une tarière ; les prélèvements ont été faits en zig zag, et un échantillon composite a été constitué par parcelle et par horizon. Tous les échantillons sont séchés, broyés et passés à travers un tamis de 2 mm avant d'être analysés au laboratoire d'analyse des sols de la Faculté d'Agronomie de l'Université Abdou Moumouni de Niamey.

2.2.2.2 Les analyses physiques et chimiques du sol et des amendements organiques

Les analyses effectuées sur les échantillons de sol ont concerné le pH-eau, le carbone organique total (C), l'Azote (N), le Phosphore (P) total et assimilable, le potassium (K) total, capacité d'échange cationique (CEC), les bases échangeables et la texture du sol méthode pipette de Robinson (Feller et al., 1991).

Les teneurs en carbone organique total (C), en azote (N) total, en phosphore (P) assimilable et en potassium (K) (méthode par calcination) du phospho-compost sont déterminés.

2.2.2.2.1. Mesure du pH

Les pH (eau) des sols et fertilisants ont été mesurés par lecture directe sur un pH-mètre Tac Ussel (pH-mètre) à électrodes en verre. Cette méthode est qualifiée d'électro métrique. La solution utilisée pour la lecture a été préparée dans un rapport terre/eau 1/ 2.5.

2.2.2.2.2. Carbone organique

La méthode de WALKLEY-BLACK a été utilisée. Le carbone est oxydé (en gaz carbonique) par du bichromate de potassium ($K_2Cr_2O_7$) en milieu sulfurique. La quantité réduite de bichromate est proportionnelle à la teneur en carbone. L'excès de bichromate est dosé en solution normale par une solution de sel de Mohr $Fe(SO_4)_2(NH_4)_6$ 0,5 N en présence du diphénylamine dont la couleur passe du bleu foncé au bleu vert.

La teneur en carbone est obtenue à partir de la formule suivante:

$$C\% = (VI-V2) \times N \times 0,3 \times 1,33/P$$

VI et V2 désignent les volumes du sel de Mohr, N sa normalité et P la prise d'essai.

L'oxydation du carbone n'étant pas complète, le résultat obtenu est corrigé par le facteur 1,33. Le pourcentage de la matière organique du sol est obtenu en multipliant le pourcentage du carbone par 1,724.

2.2.2.2.3. L'Azote

Pour les sols comme pour le guano et le fumier la méthode employée est la même. Les échantillons ont été soumis à une minéralisation KJELDAHL, avec l'acide H_2SO_4 et $C_7H_6O_3$ en présence de H_2O_2 , et du sélénium qui est utilisé comme catalyseur. Après cette minéralisation, la solution aqueuse est mélangée à du carbone actif les éléments N.

2.2.2.2.4. Dosage du phosphore total et assimilable

Le dosage du phosphore total a été fait sur le minéralisât. Grâce au colorimètre automatique, le dosage se fait selon le principe suivant: le molybdate d'ammonium et le potassium antimoine tartrate réagissent an milieu acide ascorbique en formant un complexe intensément coloré en bleu dont l'absorbance est mesurée à 880 nm. L'intensité de la coloration est proportionnelle à la quantité du phosphore dans le milieu.

La méthode utilisée celle de BRAY 1. Les échantillons de sols ont été soumis à l'extraction du phosphore. Ce phosphore a été extrait par une solution de bicarbonate de sodium et de fluorure d'ammonium tamponné à pH 8,5. Le dosage du phosphore (P) a été réalisé par colorimétrie automatique.

2.2.2.2.5. Dosage des bases échangeables et Capacité d'échange cationique

Les bases échangeables ont été déterminées après une extraction des sols par une solution d'acétate d'ammonium molaire à pH 7. Le potassium échangeable a été dosé au spectrophotomètre à émission de flammes et pour le sodium, calcium et magnésium par absorption atomique. La capacité d'échange cationique a été déterminée à partir de 2 g de sol saturé à l'acétate d'ammonium pendant 24 h. L'excès d'acétate d'ammonium est ensuite lavé à l'éthanol (95%). On extrait par la suite les ions ammonium NH_4^+ fixé en saturant à nouveau le sol par la solution de chlorure de potassium. L'auto analyseur dont le principe est basé sur la densité optique a permis de déterminer les ions NH_4^+ .

2.2.2.2.6. La granulométrie

La méthode de prélèvement à la pipette Robinson a été utilisée. Les échantillons ont été traités à l'eau oxygénée au bain-marie (destruction de la matière organique) et à l'hexamétaphosphate ($\text{Na}_6\text{P}_6\text{O}_{18}$) de sodium (dispersion des agrégats par agitation mécanique). Ce travail a permis de déterminer trois fractions de sol: les particules fines (argile et limon) et le sable.

2.2.3. Conduite de l'essai

Préparation du sol et piquetage

Pour la conduite de l'expérimentation, les opérations effectuées ont consistées à dessoucher quelques végétaux présents, et à labourer toute la superficie avant le piquetage. Les superficies des parcelles élémentaires sont de 20 m², chaque parcelle élémentaire est constituée de 5 lignes dont chacune comporte 6 poquets soit 30 poquets au total par parcelle.

Semis

Le semis est fait à la main, l'écart est de 1m x1m entre les poquets et entre les lignes. Ces dernières sont tracées avec un rayonneur à écartement fixe : 1m et à triple ligne. Le semis a été effectué à sec le 04/07/2013. Le 05/07/2013 une pluie moyenne de 12,4 mm a été enregistrée.

Entretien

Pour l'entretien de la culture, le démaillage, le sarclage et le contrôle des ennemis de culture ont été faites à la demande. Les plants ont été démarriés au premier sarclage, à raison de trois plants par poquet.

- ✓ Contrôle des adventices : il a été effectué à la demande durant toute la conduite de l'essai, deux sarclages ont été effectués.

- ✓ Contrôle des ennemis de culture : il a consisté surtout à combattre les oiseaux granivores et les criocères, et a été effectué à une seule reprise par la méthode traditionnelle (installation des épaves et fil des vieilles cassette vidéo pour les oiseaux, et fumée pour les criocères).

2.2.3.1 Mesures et observations agronomiques

Pour déterminer l'effet du phospho-compost sur la production du mil, les paramètres suivants ont été mesurés:

Pourcentage de levée : Il est évalué pour l'ensemble de la parcelle et est exprimé en pourcentage des poquets levés. Il a été apprécié sept (7) jours après le semis. Par la suite, le reste du suivi a été effectué au niveau des six (6) poquets de chaque parcelle choisis au hasard en évitant l'effet de la bordure.

Tallages : Ce paramètre agronomique a été déterminé en procédant au comptage du nombre des tiges secondaires au niveau des six (6) poquets de chaque parcelle élémentaire préalablement choisis.

Hauteur moyenne des plants : Elle est mesurée chaque semaine au niveau des six (6) poquets suivis dans chaque parcelle. Cette mesure a débuté deux semaines après l'application du phospho-compost jusqu'à l'apparition des épis. Elle est mesurée du ras du sol jusqu'au point d'attache de la gaine de la dernière feuille.

Nombre d'épis récoltés par poquet: le nombre d'épis par poquet est déterminé au stade maturité, et consiste à compter le nombre d'épis au niveau de chaque poquet suivant le traitement.

Rendement grains /parcelle en kg : Après la récolte, le battage ainsi que le pesage de la production ont été fait. Un carré de rendement de 6 m²est réalisé. Le rendement de chaque parcelle est exprimé en kg/ha.

Rendement en biomasse sèche: Après la récolte, les plants des carrés de rendement de chaque parcelle sont coupés au ras du sol et séchés au soleil pendant une semaine. Le pesage a été fait par carré de rendement et le rendement est exprimé en kg/ha.

2.2.3.1.1. Détermination de l'efficacité agronomique des fumures (EAF)

L'efficacité agronomique des fumures permet une meilleure comparaison des fumures ; le témoin absolu est considéré comme la référence avec une efficacité de 0%. Les EAF des autres fumures sont calculées en référence avec le témoin absolu en utilisant la formule suivante :

$$EAF = [(Rendement\ fumure - Rendement\ témoin) / Rendement\ témoin] \times 100$$

2.2.3.2 Analyse des données

Le logiciel utilisé pour les analyses statistiques des données est GenStat Discovery Edition 4.1 License de 2013. Les résultats relatifs à l'étude du rendement du mil ont été soumis à une analyse de variance (ANOVA). Pour la séparation des moyennes, elle a été réalisée avec le test de DUNCAN au seuil de 5 %. Pour l'organisation des données et la génération des histogrammes nous avons utilisé le tableur Microsoft Excel 2007.

Chapitre III : Résultats et discussion

3.1 Expérimentation agronomique

3.1.1. Caractérisation du sol et des amendements organiques

3.1.1.1. Caractérisation du sol

Les résultats de l'analyse des échantillons de sol prélevés sur le site avant l'installation de l'essai dans l'horizon de surface, à une profondeur de 0-20 cm et 20-40 cm (Tableau3) montrent que le sol a une granulométrie dominée par les éléments grossiers (sable) lui conférant ainsi une texture de type sableux. Au niveau des deux profondeurs, on remarque qu'il n'y a pas une grande différence entre le niveau du pH qui est neutre, aussi la teneur en phosphore totale et assimilable qui demeure moyenne. Cependant la teneur en azote et carbone du sol est très faible respectivement (0,02%) et (0,2%). Néanmoins, une différence notable ressort au niveau de la capacité d'échange cationique qui est basse à la profondeur 0-20 cm (10 méq/100g) et moyenne à 20-40 cm (18,5 méq/100g). Le rapport C/N (11,07) indique que la matière organique est fortement minéralisée. Il s'agit alors d'un sol à potentiel agronomique faible.

Tableau 3 : Caractéristiques physico chimique du sol

ELEMENTS ANALYSES		TENEURS DANS LE SOL	
		Profondeur (cm)	
		0-20	20-40
pH 1:2.5		6,88	7,25
Ca²⁺	méq/100g	7,66	8,29
Mg²⁺		3,80	3,83
Na⁺		0,03	0,03
K⁺	Mg/kg	0,01	0,01
Pass		7,66	8,29
Somme		8,44	9,08
CEC méq/100g		10,00	18,50
S/T		0,84	0,73
C %		0,20	0,23
N %		0,02	0,02
C/N		10,66	11,07
Ptot. Mg/kg		19,06	22,20
Sable %		77,98	71,13
Limon fin %		18,9	24,66
Argile %		3,12	4,21
Texture		Sable limoneux	Sable limoneux

3.1.1.2 Caractéristique du phospho-compost

Les caractéristiques physico-chimiques du phospho-compost sont présentées dans le tableau 4. Les teneurs en azote total des phospho-composts suivent la même tendance que le carbone total. En effet, il ressort une baisse des teneurs d'autant plus que la quantité de PNT apportée est élevée. Les valeurs chutent de 0,31% dans le PC1 à 0,30 avec la dose de 10% de PNT. Il ressort de ce tableau aussi que les teneurs de phosphore total et phosphore assimilable augmentent avec l'augmentation des doses de PNT de 0,33% à 0,45% pour le P. total et 0,017% 0,023% pour le P.ass. Cependant, la teneur en potassium reste la même dans les trois traitements.

Tableau 4 : Composition chimique du phospho compost

Substrat	N %	P T %	K %	P ass %
PC1 0% PNT	0,31	0,33	0,24	0,017
PC2 5% PNT	0,32	0,40	0,24	0,019
PC3 10% PNT	0,30	0,45	0,24	0,023

PC1= traitement n'ayant pas reçu le PNT

PC2= traitement ayant reçu 5% de PNT

PC3= traitement ayant reçu 10%de PN

3.1.2 Effet du phospho-compost sur la production du mil

➤ Effet des traitements sur le taux de levée

Les résultats concernant la levée sont donnés dans le tableau 5. La variété HKP utilisé pour cette expérimentation a bien germé avec un taux de germination uniforme de l'ordre de 100% sur la totalité des parcelles. Ceci est d'autant vrai que l'analyse statique à montre qu'il n'existe pas de différence significative entre les traitements ($F > 0,05$).

➤ Effet des traitements sur le tallage

Les résultats concernant le tallage sont aussi présentés dans le tableau 5. Le phospho-compost apporter deux semaines après le semis favorise la production de talles. La comparaison des moyennes montre des différences significatives entre les traitements ($F < 0,05$). La production des talles varie de 10 à 12 par poquet. Cependant, les traitements PC1, PC2 et PC3 forment un groupe homogène avec une production de talle plus élève que celle du témoin.

➤ *Effet des traitements sur la hauteur moyenne des plants*

Les effets du phospho-compost sur la hauteur des plants sont présentés dans le tableau 5.

Il ressort des résultats de l'expérimentation, que globalement, la hauteur des plants est proportionnelle à la dose du PNT utilisée dans le phospho-compost. Le témoin a connu une légère augmentation (172 cm), pouvant s'expliquer par l'effet des précédents culturaux utilisé pendant la campagne 2012. La comparaison des moyennes des différents traitements montre que les hauteurs des plants croissent avec le phospho-compost, passant de 166,7 dans le PC1 à 179,7 dans le traitement PC3.

➤ *Effets des traitements sur le nombre d'épis récoltés/poquet*

La moyenne des épis récoltés par poquet est indiquée dans le tableau 5. L'analyse de variance montre en effet, qu'il existe une différence significative entre les traitements au seuil de 5%. La comparaison de moyennes par la méthode de P.P.D.S (1,45) montre que les traitements PC1, PC2 et PC3 sont statistiquement homogènes. Par contre, ils sont tous différents de T0 avec des suppléments d'épis récoltés par poquet respectifs de 1, 1,33 et 2,33. Il varie de 5 pour le témoin, 6 pour PC1 et PC2 et 7 pour PC3.

Tableau 5 : Effet du phospho-compost sur la croissance végétative du mil

Traitement	levée	Nbre de talle (par poquet)	Hauteur (cm)	Nbre épis (par poquet)
T0	100a ±0	10a±1	172,2a ±20,29	5a ±1,73
PC1	99,6a±0,57	11b ±1,15	166,7a±22,85	6ab ±0,57
PC2	99,6a±0,57	12b±1	175,3a ±8,96	6ab ±0,57
PC3	99a ±1	12b±0,57	179,7a ±11,01	7b ±0,57
F%	0,31NS	0,02*	0,69	0,04*
PPDS	1,20	1,37	26,99	1,45

Les moyennes affectées de la même lettre dans la même colonne ne sont pas significativement différentes au seuil de 5%.

PPDS: Plus Petite Différence Significative ;

NS : non significatif ;

Nbre : nombre ;

Rdt : rendement

Témoin sans fertilisant = **T0** ; Phospho-compost sans ajout du PNT= **PC1**, Phospho-compost avec ajout de 5% du PNT =**PC2** ; Phospho-compost avec ajout de 10% du PNT= **PC3**.

➤ *Effets des traitements sur le rendement grain et le rendement paille*

Les résultats du rendement du mil sont présentés dans le tableau 6. Les rendements varient de 492 kg /ha (Témoin) à 877kg /ha (PC3). Que l'on apporte ou pas du phosphate naturel, il y a une augmentation du rendement. Lorsqu'il y a apport de phosphate naturel, l'augmentation de rendement est fonction de la quantité apportée (Tableau 6). Les rendements varient de façon significative ($F < 0,05$) en fonction de la dose de PNT utilisé dans le compostage.

Les rendements du PC1, PC2 et PC3 sont statistiquement identiques, mais différents du témoin. Le rendement grains le plus élevé (877kg/ha) est obtenu avec le traitement PC3=MO+10% PNT. L'analyse de la variance montre que des apports du compost, avec l'ajout du phosphate naturel, améliorent la production du mil. La même tendance a été observée avec la matière sèche du mil.

Les traitements PC3 et PC2 ont donné un rendement paille sèche plus important que les autres traitements, avec des suppléments respectifs de production de 610 et 385 kg/ha par rapport au témoin. Le traitement PC1 a produit 1378 kg de plus que le témoin. L'analyse de variance au seuil de 5%, n'a relevé aucune différence significative entre tous les traitements (y compris le témoin).

Tableau 6 : Efficacité agronomique du phospho-compost sur le rendement grain et le rendement paille

Traitement	Rendement grain (kg/ha)	Rendement paille (kg/ha)	EAF%
T0	491,7a	1052a	0
PC1	703,3b	1378a	30,08
PC2	790b	1437a	37,75
PC3	876,7b	1662a	43,91
PPDS 5%	203,4	667,8NS	
F%	0,017	0,26	

Les moyennes affectées de la même lettre dans la même colonne ne sont pas significativement différentes au seuil de 5%.

PPDS : Plus Petite Différence Significative

* : différence significative

T0 = Témoin sans fertilisant ;

PC1 = Compost sans ajout du PNT.

PC2 = Compost avec ajout de 5% du PNT.

PC3 = Phospho-compost avec ajout de 10% du PNT .

➤ *Efficacité agronomique du phospho-compost*

Pour mieux comparer les fumures étudiées, leurs efficacités agronomiques ont été calculées en prenant le témoin comme référence (EAF= 0%). Les résultats sont présentés dans le Tableau 6. Les résultats montrent que l'efficacité agronomique de la fumure (EAF) varie en fonction de la dose apportée ; elle est en effet de 30 pour PC1, 37,75 pour PC2, et 43,91 pour PC3. L'analyse des efficacités moyenne montre que la dose 90% de MO combiné à 10% du PNT, a le plus fort taux efficacité agronomique (43,91%) dépassant les autres fumures.

Discussion

La croissance végétative dans l'ensemble a été bonne (voir photos en Annexes), cependant, le fort taux de la levée enregistré pourrait être due à la viabilité et la bonne qualité des semences utilisées. Elle peut être également due à une préparation adéquate du sol et d'une humidité convenable due à une bonne précipitation juste après le semis. D'autre part, on constate que le témoin (sans apport) a connu une légère augmentation de la hauteur des plants par rapport à la parcelle ayant reçu uniquement de la matière organique (PC1). Ceci peut s'expliquer par l'effet du précédent cultural (niébé) utilisé pendant la campagne hivernale 2012. Ce qui corrobore avec les résultats des travaux de Eaglesham et *al.*, (1982) réalisés au Nigéria montrant un effet résiduel du niébé équivalent à 36 kg N/ha/an pour la céréale suivante. Cependant, d'autres chercheurs ont attribué les effets positifs de la rotation à l'amélioration des propriétés biologiques et physiques du sol et à la capacité de certaines légumineuses à rendre soluble le phosphore hautement insoluble lié au calcium par le biais des exsudats de leurs racines (Bationo, 1995).

De l'ensemble des résultats, il ressort que l'apport du phospho-compost a permis une bonne stimulation de la croissance végétative. Cependant, l'importance de cette stimulation dépend de la dose du Phosphate naturel apportée dans le compost. Cela suppose aussi que l'incorporation du PNT dans le compostage permettrait d'améliorer leur solubilité (Fatou Gueye et *al.*, 1986) et pourrait avoir un impact important sur l'effet résiduel. Du fait de leur faible solubilité l'efficacité de l'utilisation des phosphates naturels réside beaucoup plus dans leur effet résiduel (Visker et *al.*, 1995).

Keita (1985) a trouvé également que les apports de compost avaient des effets favorables sur la croissance en hauteur du maïs par rapport au témoin. Bazie (1984) et Lompo (1993) ont également fait le même constat sur le mil et le sorgho. D'autres part, les résultats obtenus par Gnakambary et *al.*, (2000) et Kabore (2004) ont montré que l'apport de la fumure organique entraîne une augmentation de la croissance et améliore le rendement des cultures. Mais, il ressort de cette étude que l'utilisation de la matière organique à elle seule voir même sans a été moins performant que le phospho-compost. De ces résultats, il ressort que l'utilisation du phospho-compost à elle seul est très intéressante car il augmente la croissance végétative du mil. Ce constat est particulièrement intéressant pour le producteur, qui n'a plus à dépenser pour acheter des engrais. Des résultats similaires ont été obtenus par Michel (2012).

Les résultats sur les rendements montrent qu'il existe une différence significative ($F < 0,05$) entre les traitements. L'apport des fertilisants a occasionné une augmentation progressive du

rendement. Cependant le rendement élevé a été obtenu avec la plus grande dose (PC3 = 10% PNT), ce qui corrobore avec les résultats obtenu par Ofosu-Budu et *al.*, 2008 qui a montré que l'application du phospho-compost (qui est préparé localement) a augmenté considérablement la biomasse de plante et le rendement en graine plus que le contrôle. L'augmentation progressive du rendement relative à l'application du Compost+PNT, montre que le compostage permet de réduire voire même supprimer l'effet dépressif des résidus de récolte sur le rendement. Les valeurs obtenues sur les traitements PC3 (876,7kg/ha pour les graines et 1662kg/ha pour la paille) sont largement supérieures aux rendements moyens au niveau national qui sont respectivement de 544kg/ha et 1009,38kg/ha (DGA, 2012). Les résultats des études antérieures ont montré que le phospho-compost préparé en mélangeant des résidus de l'exploitation agricole, des déjections de bétail et du sol peut être aussi efficace que le superphosphate simple (Palaniappan et *al.*, 1993 cité par Zanguina , 2009) ; même lorsqu'il est appliqué sur un sol tropical et à des valeurs de pH supérieures à 7,5 où le phosphate naturel ne se dissout pas directement (Mishra et *al.* ,1996). En effet, de nombreux travaux de recherche montrent que l'utilisation de la fumure organique permet d'obtenir des augmentations significatives des rendements sur les parcelles des cultures bénéficiaires, grâce à l'amélioration de la fertilité du sol (Mustin,1987,Bacyé,1993 ,Sedogo ,1993 ,Kaboré,1994 ,Zougmoré,1995 ;Solter,2000).

De l'ensemble des résultats, il ressort que l'adjonction des matières organique aux phosphates naturels de Tahoua entraine l'accroissement de l'efficacité de ces phosphates. Ce qui corrobore avec les résultats obtenu par Sédégo et Lompo (1984) qui ont montré que l'association fumure annuelle (BP) avec le fumier donne de meilleurs rendements par rapport à celle, fumure de correction (BP) et fumier.

Conclusion et perspectives

Dans le contexte actuel de pauvreté et de dégradation continue de la fertilité des terres, l'adoption de techniques régénératrices de la fertilité moins coûteuse est indispensable. La pauvreté des sols en matière organique, en phosphore et en azote constitue la contrainte majeure de la production agricole au Niger et plus particulièrement dans la région de Niamey où la pluviométrie annuelle ne dépasse pas 500 mm cette dernière année.

Cette étude a permis d'aborder la question liée à la valorisation du Phosphate naturel de Tahou en mettant en œuvre les phospho-compost produits avec les différentes doses PNT (5% et 10% par rapport au poids de la matière organique).

La présente étude nous a permis d'atteindre l'objectif de départ qui était de voir l'efficacité agronomique du phospho-compost sur la production du mil.

Bien que la pluviométrie était mal répartie durant la conduite de l'essai, des résultats obtenus suite à l'expérimentation agronomique, nous pouvons retenir que :

- les différents traitements ont eu des effets significatifs sur la production du mil. Globalement, tous les traitements ont permis d'accroître les rendements du mil comparativement au témoin ;
- la combinaison matière organique +PNT a engendré une augmentation sur la production par rapport à la matière organique seul et au témoin (sans apport).

Par ailleurs, il ressort de cette étude que le phospho-compost à lui seul peut remplacer valablement les engrais dans la production du mil, mais aussi lui être préféré.

Dans le souci d'une agriculture durable et d'une amélioration du cadre de vie des populations pour un développement rural durable, les conclusions de cette étude peuvent être intéressantes.

Cependant, des investigations doivent se poursuivre afin de :

- Reconduire l'expérimentation tout en appliquant les différentes modes d'apport des fertilisant ;
- Appliquer ces amendements 3 à 4 semaines avant le semis, pour que les plantes puissent beaucoup en bénéficier ;

- Faire une analyse économique de l'emploi du phospho-compost par rapport aux engrais. Il ne s'agira pas seulement de fertiliser pour avoir un surplus de production, mais il faudra prendre en compte les considérations principales que sont l'accroissement de la production dû aux engrais et les rapports entre le prix de ces engrais et celui du phospho-compost pour recommander une dose à appliquer.

Au niveau du développement, des actions de vulgarisation effective du compostage de la jacinthe d'eau (*Eichhonia cassipe*) avec l'usage du phosphate naturel pour améliorer la qualité du compost sont à renforcer.

Cela présente les avantages suivants :

- de résoudre la difficulté d'épandage des phosphates naturels ;
- d'améliorer la solubilité et par conséquent la qualité du compost.

L'avantage de cette innovation, permet aussi de débarrasser le fleuve Niger de la jacinthe d'eau, d'avoir un fertilisant moins chère qui va accroître considérablement les rendements.

Son effet durable permet la régénération du sol et permet d'obtenir des produits biologiquement sains (FCM-NIYA, 2012).

Bibliographie

Akroume C., 1985. Localisation de la matière organique des sols. Définition d'un modèle d'évolution. Thèse de docteur Ingénieur" Géologie appliquée», Institut National Agronomique, Paris-grignon, 117p

A.A.Pohlman and G.J.McColl, kinetics of metal dissolution from forest soils by organique acids. J. env. qual, 15, pp86-92 (1986).

Alzouma M, 1990. Etude écologique de la croissance et du rendement du mil (*Pennisetum glaucum*(L.) Leeke) au sahel. Effets de l'association avec les légumineuses et autres relations. Thèse de doctorat. Faculté des sciences de Louvain- la-Neuve ; 120.

Ada.A, 1994. Caractérisation de 13 variétés du mil (*Pennisetum glaucum*). Améliorées et développées par L'INRAN, mémoire de fin d'étude ITA.UAM/Niamey/FA.65p

Bationo, A., Christianson, C.B., and Baethgen, W.E. 1990. Plant density and nitrogen fertilizer effects on pearl millet production in Niger. Agronomy Journal 82:290-295.

Bationo, A., and A.U. Mokwunye. 1991. Role of manures and crop residues in alleviating soil fertility constraints to crop production: With special reference to the Sahelian and Sudanian zones of West Africa. Fert. Res. 29:117-125.

Bado B.V., Sédégo P.M., Hien V. et Lompo F., 1991. Utilisation efficace des engrais azotés pour une augmentation de la production vivrière: expérience du Burkina. In A.U.MOKUWNYE (Ed.) Alleviating Soil Fertility Constraints to increased Crop Production in West Africa, 115-123. Kluwer Academie Publishers. Netherlands

Bacye B., 1993 : Influence des systèmes de culture sur l'évolution de statut organique et minéral des sols ferrugineux et hydromorphes de la zone soudano-sahélienne. (Province du yatenga, Burkina Faso). Thèse Doct., Univ. Aix-Marseille III. 243P

Bado B.V., 1994. Modification chimique d'un sol ferralitique sous l'effet de fertilisants minéraux et organique: conséquences sur les rendements d'une culture continue de maïs, 57p+annexes

Bationo A. 1998. Fertilité des sols pour la production céréalière en zone sahélo-soudanienne et valorisation des phosphates naturels. Cahier d'études et de recherches francophones. Vol 7, 365-371.

Bekunda M.A. ; Bationo A et Ssali H. 1999. Soil fertility management in Africa : a review of selected research trials. In Replenishing Soil fertility in Africa. SSSA Special publication Number 51. 63-73.

Bhatnagar, V.S. 1987. Conservation and encouragement of natural enemies of insects pests in dryland subsistence farming: problems, progress and prospects in the Sahelian zone. *Ins. Sci. Appl.* 8. 791-795.

Buerkert, A., Bationo, A., Piepho, H.-P. 2001. Efficient phosphorus application strategies for increased crop production in sub Saharan West Africa. *Field Crops Research*, 72, 1-15.

Compaore E., 1996. Contribution à la caractérisation et à la gestion de la fertilité phosphatée de quelques sols ferrugineux tropicaux. Thèse de Doctorat, INPL. NANCY. 134 p.

Delville P.L., 1996. Gérer la fertilité des terres dans les pays du Sahel. *Diagnostics et conseils aux paysans*. CTA-GRET. Collection « le point sur » 397p.

Diallo L., 2002. Effet des engrais azotés et du fumier sur les rendements du maïs. Mémoire de fin d'étude IDR, Université Polytechnique de Bobo-Dioulasso, 58 p.

FAO, 1997. *Engrais et nutrition végétale: emploi rationnel des engrais sur les sols en zones tropicales humides*

FAO, 2011. *Manual animal production and health: Investigating the role of bats in emerging zoonoses*. Edited by Scott H. Newman, Hume Field, Jon Epstein and Carol de Jong; 15-27.

FCM-NIYA, 2005. *Fiches techniques sur les cultures maraichères. Projet de sécurisation de l'élevage et de l'Agriculture périurbaine de Niamey* ;

Fuchs J. 2009. *Interactions Between Beneficial and Harmful Microorganisms: From the Composting Process to Compost Application*. *Microbes at work: from wastes to resources*,

- Guetg., 1999: Mémento d'agriculture biologique, 349p
- ICRISAT et FAO, 1997. L'économie mondiale de sorgho et du mil. Fait, tendance et perspective, 69p.
- Illiassou, Y. 2009. Evaluation de l'effet de l'application périodique de l'urine hygiénisée sur la culture de mil (*Pennisetum glaucum*). Mémoire de fin d'étude ITA.UAM/Niamey/FA.39p
- Jika .N et OUENDEBA.B, 1985. Programmes de sélection de Mil au Niger Sorghum et Millet Workop October, Niamey-Niger p 13-19.
- Lompo, F., 1993. Contribution à la valorisation des phosphates naturels du Burkina Faso: Etude des effets de l'interaction phosphate naturel-matière organique. Thèse de Docteur Ingénieur. Université nationale de Côte d'Ivoire; 247 p.
- Lompo, F., 1993. Contribution à la valorisation des phosphates naturels du Burkina Faso: Etude des effets de l'interaction phosphate naturel-matière organique. Thèse de Docteur Ingénieur. Université nationale de Côte d'Ivoire; 247 p.
- Lompo, D.P., 2005. Gestion de la fertilité des sols dans les systèmes de culture de l'ouest du Burkina Faso: Evaluation des effets Agronomiques et de rentabilité économique de trois formules de fumure. Mémoire de fin d'études IDR, Université Polytechnique de Bobo-Dioulasso, 60 p.
- Mbaye D.F, 1986. Recherches sur les maladies du mil. Rapport de campagne 1985, CNRA/ISRA/Bambey, 20p.
- Mbaye, D. F. 1993. Contraintes phytosanitaires du mil dans le Sahel: Etat des connaissances et perspectives. http://www.bondy.ird.fr/pleins_textes/pleins_textes_6/colloques2/38960.pdf
- Niangado, O. et Ouendeba, B. 1987. Amélioration variétale mil en Afrique de l'Ouest, page 83-94 dans proceedings International Pearl millet workshop.
- Ndoye, M. et Gahukar, R. T. 1989. Les insectes ravageurs du mil à chandelles dans le Sahel. African journal of plant protection 4 (2) :1-43.
- Ouattara B., Ouattara K., Serpentie G., Mando A., Sedogo MP, Bationo A. 2006. Intensity cultivation induced effects on soil organic carbon dynamic in the western cotton area of Burkina Faso. Nutr. Cycl. Agroecosyst. pp. 331-339.

Tostain, S.1993. Évaluation de la diversité génétique des mils pénicillaires diploïdes *pennisetum glaucum* (L) R.Br. aux marqueurs enzymatiques. Etude des relations entre formes sauvages et cultivées. page 17. Thèse 327p. ORSTOM, Paris 1994.

Rocafremi, 2002. Résultat du projet P6 (1997-2001). Gestion Intégrée des ennemis du mil. ICRISAT, direction de Développement et de la coopération (DDC) Niamey, Niger.36P.

Sédégo M.P., 1981: Contribution à la valorisation des résidus culturaux en sols ferrugineux et sous climat tropical semi-aride (matière organique du sol et nutrition azotée des cultures).Thèse de Docteur Ingénieur,Institut polytechnique de Lorraine,Nancy,195 p

Soltner D., 2003.Les bases de la production végétale. Tome 1. Le sol et son alimentation. Collection Sciences et techniques agricoles.23^e édition, 472p

Sawadogo H., 2006. Fertilisation organique et phosphatée en système de culture zaï en milieu soudano-sahélien du Burkina Faso. Thèse de doctorat : Faculté universitaire des Sciences agronomiques de Gembloux (Belgique).

Soma.D.M., 2010. Effet des apports répétés de diverses sources d'amendements organiques dans un sol ferrugineux tropical lessivé (Saria,BurkinaFaso) sur la biodisponibilité du phosphore et la production du sorgho. Mémoire Diplôme d'étude Approfondies,UPB/IDR/BOBO-DIOULASSO ,60p.

Zanguina, A. ,2009.contribution à la caractérisation physico-chimique et a la mise en valeur agronomique du phosphate naturel de Tahoua (Niger) : essais de fabrication de certains engrais minéraux et de phospho-compost. Thèse de doctorat, UAM, Niamey /Niger.

Webographie :

<http://www.wikipedia.org> : L'encyclopédie libre

<http://www.fao.org> : Food and Agriculture Organisation

<http://agmécologie.cirad.fr> : Centre International de Recherche Agronomique pour le développement

<http://www.vulgarisation.net>: Transfert de Technologies en Agriculture. Maroc

<http://www.inra.fr> : Institut National de la Recherche Agronomique. France

ANNEXES



1 : Photos : Témoin à 60 jours

2 : Photo PC1 : Matière organique (MO) à 60 jours



3 : Photo PC2 : 95% de MO+5%PNT, 60 jours

4 : PC3 : 90%de MO+10%PNT, 60 jours