

BURKINA FASO
Unité – Progrès – Justice

**MINISTERE DES ENSEIGNEMENTS SECONDAIRE ET SUPERIEUR
(MESS)**

**UNIVERSITE POLYTECHNIQUE DE BOBO-DIOULASSO
(UPB)**

**INSTITUT DU DEVELOPPEMENT RURAL
(IDR)**



MEMOIRE DE FIN DE CYCLE

Présenté en vue de l'obtention du

**DIPLOME D'INGENIEUR DU DEVELOPPEMENT RURAL
OPTION : Agronomie**

THEME : Optimisation de la fertilisation azotée du maïs en culture pluviale dans l'ouest du BURKINA FASO: utilisation du modèle agronomique DSSAT

Présenté par:

BAMBARA Franck Abdel Aziz

Maîtres de stage: Dr Sansan YOUL

M. Seydou SAGNON

Directeur de mémoire: Dr Bernard BACYE

N° :.....- 2012/AGRONOMIE

JUIN 2012

TABLE DES MATIERES

| | |
|---|-------------|
| DEDICACE..... | i |
| REMERCIEMENTS..... | ii |
| LISTE DES FIGURES..... | iv |
| SIGLES ET ABREVIATIONS | vi |
| RESUME..... | vii |
| ABSTRACT | viii |
| INTRODUCTION..... | 1 |
| CHAPITRE I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE..... | 3 |
| 1.1. Généralités sur le Maïs | 3 |
| 1.1.1. Origine, morphologie et culture du Maïs | 3 |
| 1.1.2 .Production et consommation de Maïs au Burkina Faso | 4 |
| 1.1.3. Contraintes à la culture du maïs | 5 |
| 1.1.3.1. Variabilité climatique..... | 5 |
| 1.1.3.2. Baisse de la fertilité des sols | 5 |
| 1.1.3.3. Maladies | 6 |
| 1.1.3.4. Insectes | 6 |
| 1.1.3.5. Mauvaises herbes | 7 |
| 1.2. Généralités sur la fertilisation | 8 |
| 1.2.1. Fertilisation azotée du Maïs | 8 |
| 1.2.1.1. Rôle agronomique de l'azote..... | 8 |
| 1.2.1.2. Excès d'azote..... | 8 |
| 1.2.1.3. Carences azotées | 8 |
| 1.2.2. Carences en éléments fertilisants autre que l'azote..... | 9 |
| CHAPITRE II: GENERALITES SUR LA ZONE D'ETUDE..... | 10 |
| 2.1. Présentation du cadre de l'étude..... | 10 |
| 2.2. Climat | 10 |

| | |
|--|-----------|
| 2.3. Végétation | 13 |
| 2.4. Sols | 14 |
| CHAPITRE III : MATERIEL ET METHODES..... | 15 |
| 3.1. Matériel | 15 |
| 3.1.1. Matériel végétal | 15 |
| 3.1.2 .Fertilisants utilisés..... | 15 |
| Fumure minérale | 15 |
| Fumure organique | 15 |
| 3.2. Méthodes | 16 |
| 3.2.1. Dispositif expérimental | 16 |
| 3.2.2. Conduite de l'essai | 17 |
| 3.2.2.1. Préparation du sol..... | 17 |
| 3.2.2.2. Semis | 17 |
| 3.2.2.3. Entretien | 17 |
| 3.2.2.4. Paramètres mesurés | 18 |
| 3.2.3. Méthodologie de calibrage et d'évaluation du modèle DSSAT..... | 18 |
| 3.2.3.1. Calibrage du modèle DSSAT | 18 |
| 3.2.3.2. Simulation de scénarios de gestion d'eau et des nutriments pour la production de maïs | 19 |
| 3.2.3.3. Données de sortie de simulation..... | 19 |
| 3.2.3.4. Evaluation du modèle..... | 20 |
| 3.2.3.5. Application du modèle DSSAT : Analyse saisonnière | 21 |
| 3.2.4. Analyse des données | 22 |
| CHAPITRE IV: RESULTATS ET DISCUSSION | 23 |
| 4.1. Effets des doses d'engrais sur les composantes de rendement du maïs | 23 |
| 4.1.1. Résultats | 23 |
| 4.1.2. Discussion | 24 |

| | |
|--|-----------|
| 4.2. Simulation de la croissance et du développement..... | 25 |
| 4.2.1. Résultats | 25 |
| 4.2.1.1. Calibrage du cultivar | 25 |
| 4.2.1.2. Evaluation de la performance du modèle | 26 |
| 4.2.1.2.1. Biomasse végétale | 26 |
| 4.2.1.2.2. Biomasse totale | 28 |
| 4.2.1.2.3. Rendement grain | 30 |
| 4.2.2. Discussion | 31 |
| 4.2.3. Application du modèle DSSAT à l'évaluation pluriannuelle des traitements..... | 32 |
| 4.3. Synthèse | 35 |
| CONCLUSION..... | 36 |
| REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES | 38 |
| ANNEXES | ix |

DEDICACE

A mes parents:

BAMBARA Didier et KOUDOUGOU Simone

Qui m'ont soutenu et encouragé,

A SAWADOGO Rosine:

Pour l'affection que vous avez eue à mon égard et les sacrifices consentis,

A mes frères et sœurs

Je dédie ce mémoire !

REMERCIEMENTS

Ce travail est le couronnement de notre formation à l’Institut du Développement Rural (IDR). Il a fait l’objet d’un partenariat entre l’IDR et l’Institut de l’Environnement et de Recherches Agricoles (INERA) et le Centre International pour la Fertilité des Sols et le Développement (IFDC). Pendant notre travail, nous avons bénéficié du concours de nombreuses personnes à qui nous voulons témoigner notre gratitude.

Nos sincères remerciements s’adressent particulièrement:

- A L’IFDC notre institution hôte pour le mémoire. Elle restera pour moi un centre de référence.
- Au Dr Sébastien KIEMA chef de station de l’INERA/BANFORA pour nous avoir accepté dans cette structure ;
- Au Dr Sansan YOUL, chercheur au Programme Gestion des ressources naturelles et système de production (PGRN/SP) de l’IFDC, notre maître de stage pour son accueil, sa disponibilité et son encadrement malgré ses charges diverses. Sachez combien nous sommes reconnaissant pour toutes les opportunités offertes tout au long de cette étude ;
- Au Dr Bernard BACYE, notre directeur de mémoire. Toujours disponible malgré ses multiples occupations. Ses critiques et suggestions ont été d’un grand apport pour ce travail ;
- A Monsieur Seydou SAGNON de l’INERA/BANFORA, pour nous avoir suivi tout au long de notre stage et aussi pour sa patience, ses explications, ses précieux conseils ;
- Au Dr Moussa GUIRA de l’INERA/station de BANFORA pour ses conseils ;
- A Monsieur Jean OUEDRAOGO Doctorant à l’IFDC pour ses conseils et les échanges constructifs ;
- A Mlle Alimata BANDAOGO Doctorante en stage à l’IFDC pour ses conseils et les discussions constructives ;
- A Monsieur Abdallah DAO de l’INERA/station de Farokobâ ;
- A Monsieur Thomas SIRIMA de l’INERA/station de BANFORA, pour ses conseils et son assistance morale et financière;
- A tout le personnel de l’IFDC pour l’hospitalité manifestée à notre égard ;
- A tout le personnel de l’INERA/station de BANFORA pour leurs soutiens multiformes ;
- A tout le personnel du programme GRN/SP de la station de Farokobâ pour leur assistance;
- A tout le corps enseignant de l’IDR pour nous avoir assuré une formation de qualité ;
- A Monsieur BALOGOUN Ibouraïman de la Faculté des Sciences Agronomiques de l’Université d’Abomey Calavi au BENIN pour sa franche collaboration et les échanges

constructifs ;

- Aux camarades SIRI Adama, SOMDA Bienvenu, TRAORE Moustapha, OUATTARA Yaya, TRAORE Patrick, DA Grégoire, OUATTARA Adama, YIGO Ludovic, YERBANGA Emmanuel ainsi que toute sa famille pour la bonne cohabitation ;
- A tous nos camarades de classe pour l'ambiance conviviale durant cette formation ;
- A M. TIENDREBEOGO Pierre, Madame TIENDREBEOGO née COMPAORE Bernadette ainsi que leurs enfants Mélanie, Evariste, Sony, Regina, Juliette, Jeanine, je dois une reconnaissance infinie pour leur assistance jusqu'à ce jour.

Qu'ils trouvent tous ici l'expression de ma profonde gratitude !

LISTE DES FIGURES

| | |
|---|----|
| Figure 1: Diversité des épis de maïs..... | 4 |
| Figure 2: Variation de la pluviométrie moyenne annuelle (en mm) de Banfora de 1982-2011. | 11 |
| Figure 3: Pluviosité mensuelle (en mm) de Banfora au cours de la saison humide 2010-2011. | 11 |
| Figure 4: Température moyenne mensuelle (en °C) du site de Banfora durant l'année 2011. | 12 |
| Figure 5: Durée d'insolation moyenne (en heures) à Banfora durant l'année 2011. | 12 |
| Figure 6: Humidité relative moyenne mensuelle (en %) du site de Banfora durant l'année 2011..... | 13 |
| Figure 7: Schéma du dispositif expérimental..... | 17 |
| Figure 8: Représentation dispersée de la biomasse simulée en fonction de la biomasse observée..... | 28 |
| Figure 9: Représentation dispersée de la biomasse totale simulée en fonction de la biomasse totale observée..... | 29 |
| Figure 10 : Représentation dispersée du rendement grain simulé en fonction du rendement grain observé. | 31 |
| Figure 11: Représentation de la variabilité du rendement grain en fonction des traitements sur une période de 32 ans. | 34 |

LISTE DES TABLEAUX

| | |
|--|----|
| Tableau I : Production de céréales au Burkina Faso en 2010 | 5 |
| Tableau II: caractéristiques physico-chimiques des sols des sites des essais à la station de Banfora | 14 |
| Tableau III: Caractéristiques de la variété de maïs étudiée..... | 15 |
| Tableau IV: Caractéristiques chimiques de la fiente..... | 15 |
| Tableau V : Prix de vente et coûts de production de maïs dans la zone d'étude | 22 |
| Tableau VI: Effet des traitements sur les composantes de rendement du maïs | 24 |
| Tableau VII: Coefficients génétiques calculés pour la variété Massongo à l'aide du programme GLUE..... | 26 |
| Tableau VIII: Comparaison entre les valeurs observées et simulées, de la biomasse produite. | 27 |
| Tableau IX: Comparaison entre les valeurs observées et simulées, de la biomasse totale. | 29 |
| Tableau X: Comparaison entre les valeurs observées et simulées, du rendement grain. | 30 |
| Tableau XI : Rendement grain simulés en fonction des traitements de 1980-2011 | 33 |
| Tableau XII : Analyse financière des différentes formules d'engrais sur 32 ans..... | 34 |

SIGLES ET ABREVIATIONS

CIMMYT: Centre International pour l'amélioration du maïs et du blé

CRPA: Centre Régional de Promotion Agropastorale

DRREAO: Direction Régionale de Recherches Environnementales et Agricoles de l'Ouest

DSSAT: Decision Support System for Agro technology Transfer

FAO: Food and Agricultural Organisation

GRN/SP: Gestion des ressources naturelles et système de production

IBSNAT: International Benchmark Sites Network for Agrotechnology Transfer

ICASA: International Consortium for Agricultural Systems Applications

IDR: Institut du Développement Rural

IFDC: International Center for Soil Fertility and Agricultural Development

IITA: International Institute of Tropical Agriculture

INERA: Institut de l'Environnement et de Recherches Agricoles

JAS: Jour Après Semis

KCl: Chlorure de Potassium

MAHRH: Ministère de l'Agriculture, de l'Hydraulique et des Ressources Halieutiques

MO : Matière Organique

NRMSE: Erreur moyenne normalisée de prédiction

R²: Coefficient de détermination

RMSE: Root Mean Square Deviation (distance moyenne entre les simulations et les mesures)

SN. SOSUCO: Nouvelle Société Sucrière de la Comoé

TSP: Triple Super Phosphate

UPB: Université Polytechnique de Bobo-Dioulasso

RESUME

Le maïs (*Zea mays L.*) est une céréale importante pour le Burkina Faso. Cependant, les rendements restent faibles. Pour optimiser la nutrition minérale du maïs en vue d'un accroissement des rendements, des combinaisons optimales d'engrais spécifiques aux zones agro écologiques ont été développées. La présente étude conduite dans la station de recherche INERA de BANFORA avait donc pour objectif global d'évaluer la performance des différentes formules d'engrais dans les conditions spécifiques du site d'étude. A cet effet, la variété de maïs Massongo de cycle intermédiaire a été retenue. Afin d'atteindre cet objectif, un dispositif expérimental en bloc Fisher composé de quatre (04) répétitions ayant chacune dix (10) parcelles de 25m² a été mis en place. Les traitements sont : T1=N0P0K0; T2=N0P0K0+MO; T3=N60P10K12; T4=N97P20K48; T5=N111P30K60; T6=N80P30K40; T7=N90P30K40; T8=N100P30K40; T9=N110P30K40; T10=N120P30K40. Le rendement et les composantes de rendement ont été analysés avec le logiciel de statistique général Genstat et l'évaluation des formules a été faite par le modèle agronomique DSSAT. Le rendement grain, la biomasse végétale, la biomasse totale ont été simulés par le modèle CERES-Maize de DSSAT v4.5. Ainsi une confrontation des résultats observés et ceux simulés a été réalisée. L'analyse statistique des données relatives au rendement et ses composantes ont montré que les options développées (T6, T7, T8, T9 et T10) donnent de meilleurs résultats par rapport à la dose vulgarisée T3. La comparaison des données simulées avec celles observées traduisent des sous-estimations pour la biomasse totale et la biomasse végétale. Par contre, il a surestimé le rendement grain. Toutefois, la performance du modèle a été bonne pour la simulation des paramètres de rendements du maïs avec des Erreur moyenne normalisée de prédition (NRMSE) comprises entre 10% et 23% et des coefficients de corrélation supérieur à 80%. L'analyse pluriannuelle sur une période de 32 ans, allant de 1980 à 2011 a montré que le traitement T6 (N80-P30-K40) représente la meilleure combinaison NPK pour une production du maïs et présentant moins de risque du point de vue variabilité climatique. De plus l'analyse stratégique et financière a également montré que le traitement T6 (N80P30K40) est la meilleure combinaison optimale en termes de revenu monétaire pour la production du maïs. En perspective, ces résultats demandent à être confirmés et vulgarisés par la suite. Les communautés notamment les chercheurs et les producteurs doivent s'approprier cet outil qui aide à des prises de décision.

Mots clés: Maïs, Fertilisation, DSSAT, variabilité climatique, Simulation, BANFORA.

ABSTRACT

Maize (*Zea mays L.*) is among the major cereal in Burkina Faso. However, yields remain low. In order to optimize mineral nutrition of Maize plant and to increase yields, optimal combinations of fertilizers to specific agro-ecological zones have been developed. The study has been carried out in the research station of INERA BANFORA and the main objective is to assess the performance of different fertilizer formulas to the specific conditions of the study site. For the study, maize variety Massongo that has an intermediate cycle was chosen. To achieve this objective, a block fisher design with four (4) repetitions and ten (10) plots of 25m² each has been established. The treatments are: T1 = NOP0K0; T2 = NOP0K0 + MO; T3 = N60P10K12, T4 = N97P20K48; T5 = N111P30K60, T6 = N80P30K40; T7 = N90P30K40, T8 = N100P30K40; T9 = N110P30K40, T10 = N120P30K40. Yield and yield components were analyzed with statistical software Genstat and the assessment of the formulas was made by the agronomic model DSSAT. Grain yield, biomass, total biomass were simulated by the CERES-Maize model of DSSAT v4.5. So, a comparison of observed and simulated results was performed. The statistical analysis of the data relative to yield and its components showed that the developed options (T6, T7, T8, T9, and T10) give better results compared to the dose popularized T3. The comparison of the simulated data with those observed underestimates the total biomass and the vegetable biomass. On the other side, it overestimated the grain yield. However, model performance was good for the simulation parameters of maize yields with NRMSE between 10% and 23% and correlation coefficients greater than 80%. The multi-year analysis over a period of 32 years from 1980 to 2011 showed that the treatment T6 (N80-P30-K40) NPK represents the best combination for maize production and with less risk in terms of climate variability. More strategic and financial analysis also showed that the treatment T6 (N80P30K40) is the best combination in terms of optimal monetary income for maize production. In perspective, these results require confirmation before its scaling out. Communities such as researchers and farmers need to appropriate this tool for decision making.

Keywords: Maize, Fertilizer, DSSAT, climate variability, Simulation, BANFORA.

INTRODUCTION

Au Burkina Faso, le maïs est la 3^{ème} céréale de grande culture après le sorgho et le mil (SANOU, 2003). Dans la zone ouest du pays où la pluviométrie et les sols sont plus favorables, le maïs occupe la première place dans l'assoulement (BACYE et BORO, 2011). La superficie consacrée à la culture du maïs au Burkina est passée de 73037 ha en 1997 à 790310 ha en 2010 (FAO, 2011). Malgré cette hausse, le Burkina Faso, à l'instar de la plupart des pays du sahel est confronté depuis de nombreuses années à une grave crise alimentaire liée aux effets des phases de sécheresse, mais aussi à la dégradation de la qualité des terres cultivables (SEDEGO, 1993). De nos jours, l'irrégularité et la baisse de la pluviométrie, la pauvreté des sols et la faible fertilisation sont les contraintes majeures qui limitent fortement les rendements au champ. En effet, la plupart des sols de l'Afrique subsaharienne et plus précisément ceux des zones arides et semi-arides sont dans un état d'altération avancé et présentent un déficit en éléments nutritifs (PIERI, 1989). Les éléments nutritifs exportés ne sont pas remplacés de manière adéquate (FAO, 2003). De plus l'Afrique subsaharienne, en l'occurrence le Burkina Faso a la plus basse consommation d'engrais minéraux, environ 10 kg d'éléments nutritifs (N, P₂O₅, K₂O) par hectare et par an par rapport à une moyenne de 90 kg au niveau mondial, 60 kg au Proche Orient et 130 kg en Asie (FAO, 2003). Cette faible consommation des engrains est sans doute liée à leurs prix et surtout au faible revenu des producteurs. La production de maïs souffre ainsi d'apports insuffisants de fertilisants (engrais minéraux ou organiques).

Face à la pression démographique, les variations pédoclimatiques et les techniques de fertilité des sols très anciennes, une intensification de la production agricole s'avère nécessaire. Malgré l'introduction de nouvelles variétés à haut rendement, le Burkina Faso a encore besoin d'augmenter la productivité du maïs d'une manière qui préserve les ressources naturelles et empêche une nouvelle dégradation qui a caractérisé la plupart de ses sols. L'amélioration de la fertilité des sols pourrait constituer donc la clé pour inverser les tendances négatives dans la production du maïs. La manière la plus efficiente d'évaluer ces interactions pourrait se faire par l'intermédiaire des méthodes informatisées et surtout à l'aide de modèle de simulation de la croissance, de développement et de rendement des cultures. MATHEWS et *al.* (2000) soulignent la nécessité d'intégration de la modélisation comme outil complémentaire dans les programmes de recherche agronomique traditionnelle. Le modèle agronomique DSSAT (Decision Support System for Agro technologique Transfer) répond tout à fait à ces impératifs. Par conséquent, le modèle a été utilisé pour tester de nouvelles formules d'engrais pour une production actuelle et durable du maïs.

La présente étude dont le thème est : «*Optimisation de la fertilisation azotée du maïs en culture pluviale dans l'ouest du BURKINA FASO : utilisation du modèle agronomique DSSAT*» a pour objectif d'évaluer la performance des formules de fumures pour une production durable du maïs dans les conditions agropédo climatiques de la Comoé. Spécifiquement il s'agit d'employer le modèle CERES-Maize de DSSAT pour évaluer la performance des formules d'engrais d'une part et d'autre part tester la sensibilité des formules d'engrais vis-à-vis de la variabilité climatique et évaluer leur réponse à la culture.

Le présent mémoire comprend trois (03) chapitres :

- Le premier chapitre est consacré à la synthèse bibliographique qui traite des généralités sur le Maïs, la fertilisation azotée.
- Le deuxième chapitre présente les matériels et méthodes utilisés dans la conduite de l'étude.
- Le troisième chapitre est consacré aux résultats et discussions suivis d'une conclusion.

CHAPITRE I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

1.1. Généralités sur le Maïs

1.1.1. Origine, morphologie et culture du Maïs

Le Maïs a pour nom scientifique *Zea mays* L. Il appartient à la classe des monocotylédones, la sous-classe des commelinidaes, l'ordre des cypérales, la famille des poacées (ou graminées) et la sous-famille des panicoïdées. Le Maïs est une plante tropicale herbacée. Son origine reste encore imprécise mais des auteurs comme (ROUANET, 1984; GAY, 1984) attestent qu'il est originaire de l'Amérique centrale plus précisément des hauts plateaux mexicains où de nombreux échantillons témoignent de sa présence à plus de 5000 ans avant Jésus-Christ. Il est cultivé pour ses grains riches en amidon. En Afrique subsaharienne, la culture du maïs est manuelle alors que dans les pays industrialisés; c'est une culture intensive mécanisée hautement productive.

Le plant de Maïs se compose d'une tige unique, de gros diamètre, pleine, lignifiée et formée de plusieurs entrenœuds d'une vingtaine de centimètres, séparés par des nœuds. Il a une taille variable; pour les variétés couramment cultivées, la taille varie généralement de 1 à 3 m. Au niveau de chaque nœud, de manière opposée, s'insèrent les feuilles à limbe allongées et à nervure parallèles. Le Maïs est une espèce à pollinisation croisée où les inflorescences femelles (épis) et les inflorescences mâles (panicules) sont disposées à des endroits distincts sur la plante. Les épis, souvent à raison d'un épi par tige sont formés d'un nombre variable de rangées de grains (de 12 à 16), qui fournissent entre 300 à 1000 grains. Le grain de Maïs est formé d'un embryon, d'un tissu de réserve, l'albumen et d'une enveloppe fine et translucide, le péricarpe. L'albumen est constitué essentiellement de grains d'amidon; c'est l'amidon corné qui donne sa couleur aux grains de Maïs, généralement jaune, blanc, rouge ou noir. La figure 1 présente la diversité de couleur, de forme et de taille que peuvent avoir les épis de Maïs.

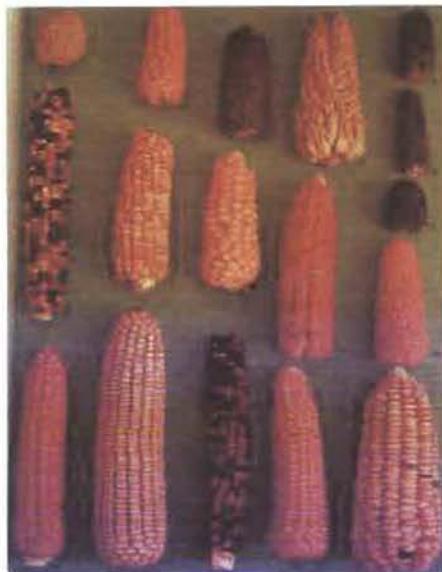


Figure 1: Diversité des épis de maïs.

(Source: www.wikipedia.com) 30/12/2012

Le système racinaire du Maïs est composé d'un grand nombre de racines adventives situées sur les nœuds à la base de la tige. Il est caractérisé par des racines traçantes (dites racines de surface), qui prélèvent l'eau et les nutriments nécessaire à la plante dans les couches les plus superficielles du sol. Ce type d'exploitation des ressources du sol fait que la plante est très exigeante en azote et en eau, proportionnellement aux rendements élevés qu'elle permet; ce qui pose de graves problèmes environnementaux dans les régions tempérées.

Le Maïs ainsi que d'autres graminées tropicales (comme la canne à sucre ou le sorgho), fait partie des plantes dites en C4. (GUY, 1984).

La culture du Maïs nécessite une température minimum de 10°C pour une germination active et au moins 18°C pour sa floraison. Son rendement dépend de la satisfaction de ses besoins en eau en particulier dans les deux (02) semaines précédent et suivant la floraison (période critique). C'est une culture qui préfère les sols profonds et riches mais qui peut s'accommoder à de conditions plus difficiles comme les sols sableux ou argileux voire calcaires, sous réserve d'assurer les apports d'eau et d'éléments nutritifs nécessaires (GUY, 1984)

1.1.2 .Production et consommation de Maïs au Burkina Faso

Au Burkina Faso, le Maïs est une culture essentiellement pluviale (IDDI, 1987). La région ouest du pays avec une superficie de près de 58000 km² soit 20% du territoire national est la zone par excellence de production du Maïs en raison des conditions climatiques qui lui

sont favorables. En vue d'une intensification de la culture du Maïs, des efforts sont entrepris ces dernières années avec la vulgarisation de la petite irrigation. Il y a aussi l'utilisation des cultivars qui ont généralement un cycle court qui se rencontrent dans tout le pays (SANOU, 1996). En effet, grâce à la recherche les producteurs disposent des variétés à haut rendement atteignant 5 à 6 T/ha. La production nationale de maïs a atteint 1133384 T en 2010 contre 606291 T en 2001 (FAO, 2011). Selon une étude réalisée par le MAHRH (2001) sur la consommation des céréales sèches en zone urbaine, le Maïs est la plus appréciée en ville. Il représente 54% de la consommation de céréales dans les deux grandes villes: Ouagadougou et Bobo-Dioulasso et un peu moins de (30%) dans les autres villes. Le tableau I donne la production de céréales au Burkina Faso en 2010.

Tableau I : Production de céréales au Burkina Faso en 2010

| Culture | Surface cultivée (ha) | Production (tonne) | Rendement (T/ha) |
|-----------|-----------------------|--------------------|------------------|
| Sorgho | 1983120 | 1990061 | 1,00 |
| Mil | 1361840 | 1147759 | 0,84 |
| Maïs | 790310 | 1133384 | 1,43 |
| Riz paddy | 132497 | 232850 | 1,76 |

Source: FAOSTAT 2011. Données issues du site Internet de la FAO (Food and agricultural organization of the United Nations)

<http://www.fao.org> en 2011

1.1.3. Contraintes à la culture du maïs

1.1.3.1. Variabilité climatique

Le Maïs en conditions tropicales est en grande partie cultivé sous pluie, même dans les zones où la sécheresse est considérée comme étant la contrainte abiotique la plus importante (DZOTSI, 2002).

Selon KAMBIRE et *al.*, (2010) la période de sécheresse la plus cruciale du maïs est de 5 jours avant la floraison femelle. Selon le CIMMYT (1991), durant cette période critique (20 jours avant la floraison et 10 jours après), la plante absorbe 45% des besoins en eau. Un stress hydrique à cette période entraîne des pertes de rendement qui peuvent atteindre 60%.

1.1.3.2. Baisse de la fertilité des sols

La baisse de la fertilité des sols se montre de plus en plus préoccupante par suite de la quasi-disparition des jachères imputable à une pression démographique de plus en plus forte

sur la terre et surtout de leur exploitation intensive et continue. Le Burkina Faso, selon la classification française rapportée par (DRABO, 2011) compte huit principaux types de sols :

- La classe des sols à sesquioxides de fer et de manganèse (39%), constituée par la sous-classe des sols ferrugineux tropicaux ou lixisols (classification, FAO); sont les plus dominants;
- Les sols peu évolués d'érosion (26%);
- Les sols hydromorphes (13%);
- Les sols brunifiés (6% avec des cas d'hydromorphie);
- Les vertisols (6%), qui sont lourds à l'état humide et dur à l'état sec;
- La classe des sols sodiques ou salsodiques (5%) caractérisés par la prise en masse du sol et à la tendance à l'alcalinisation;
- Les sols minéraux bruts et les sols halomorphes (3%) ne représentent pas d'intérêt agronomique, mais pouvant servir de pâturage;
- Les sols ferrallitiques (2%) à texture grossière avec une faible réserve en eau.

La majorité de ces sols est caractérisée par une teneur en matière organique et minérale relativement faible. La teneur en matière organique des sols est inférieure à 1% pour 55% des sols étudiés, de 1 à 2% pour 29% et supérieure à 2% pour seulement 16% des sols (PNUD-FAO, 2008). PIERI (1989) observe des taux de MO de l'ordre de 0,7% dans les sols ferrugineux tropicaux sous culture et inférieures à 3% sous végétation.

Le faible taux de matière organique de ces sols ne permet pas de rentabiliser l'apport d'engrais minéraux; ce qui constitue un facteur limitant pour la productivité de ces terres.

1.1.3.3. Maladies

Les maladies causées par des champignons, des bactéries, des virus entraînent d'importantes pertes de rendement au champ. Des rapports épidémiologiques (CIMMYT, 2000) indiquent que les pertes de rendement peuvent atteindre 80% dans le cas du Mildiou. Au Burkina Faso, la maladie de la striure du maïs provoquée par le Maize Streak Virus (MSV) est l'une des principales causes des pertes de rendements du maïs (SERE, 1990; TRAORE, 1993). En 1983, les pertes occasionnées par l'explosion de la maladie ont été estimées selon SERE (1990) à 30% de la production dans la zone maïsicole du pays. Cependant l'utilisation des variétés résistantes a permis de réduire l'incidence de la maladie de 6% en 1983 et 3% en 1990 (TRAORE, 1997).

1.1.3.4. Insectes

Les insectes par leurs attaques causent de multiples dégâts aux cultures au champ

entrant des dégâts sur les tiges (borers), les racines, les feuilles (aphides, et criquets). C'est le cas aussi des insectes vecteurs de maladie dont les travaux conduits par TRAORE et al. (1996) au Burkina Faso ont permis d'identifier l'espèce *Cicadulina mbila Naudé* (*Homoptera Cicadellidae*) comme l'espèce la plus redoutable dans la transmission du MSV. A la postproduction, les dégâts sont causés par les charançons, les grands capucins rendant parfois inutilisables les grains en entrepôt.

1.1.3.5. Mauvaises herbes

La compétition des mauvaises avec les cultures pour l'eau, les nutriments, la lumière explique pourquoi leur incidence néfaste sur les rendements peut atteindre des niveaux très importants DZOTSI, 2002). Selon IITA (2001), dans les savanes nigérianes, les pertes de rendement infligées par les mauvaises herbes atteignent 92% de la production. Le striga est une véritable peste en Afrique subsaharienne. Chaque année, il creuse un manque à gagner correspondant à 7 milliards de dollar US à l'économie africaine (FAO, 2001).

1.2. Généralités sur la fertilisation

1.2.1. Fertilisation azotée du Maïs

Définie par FALISSE et LAMBERT (1994), la fertilisation est un ensemble de pratiques coordonnées ayant pour objectif d'assurer aux plantes cultivées une alimentation correcte dans l'ensemble des éléments nutritifs. Elle a pour objectif:

- de créer, améliorer ou maintenir les caractéristiques biologiques et physico-chimiques du sol aptes à optimiser l'absorption par les plantes des éléments nécessaires à leur croissance et aux rendements.
- d'assurer la complémentation des fournitures en provenance du sol.

1.2.1.1. Rôle agronomique de l'azote

Selon FALISSE et LAMBERT (1994), l'azote est le facteur principal de la croissance des plantes et du rendement des cultures. Il favorise l'augmentation de la densité foliaire des couverts végétaux. Il tend à prolonger la durée du fonctionnement des organes verts; à retarder la sénescence et la maturation. Cependant un apport précoce peut dans certains cas favoriser la précocité. Il est responsable de l'affaiblissement de résistance mécanique de la plante et de la sensibilité à certaines maladies cryptogamiques.

1.2.1.2. Excès d'azote

L'excès d'azote peut avoir des conséquences variables selon la culture. Chez le Maïs; on distingue:

- un retard de maturité dû à l'allongement excessif de la période végétative
- une sensibilité plus grande à des accidents tels que la verse. En effet l'excès d'azote en début montaison est souvent la cause favorisante de la verse.
- une sensibilité plus grande aux maladies car les tissus restent vulnérables pendant longtemps.

1.2.1.3. Carences azotées

La carence ou déficience est une situation d'insuffisance d'un élément nutritif caractérisée par l'apparition de symptômes (LAMBERT et al., 1994). On distingue les carences vraies et les carences induites.

- la carence vraie est le résultat d'un manque d'azote dans le sol. Cette insuffisance peut être naturelle ou consécutive à l'action épuisante des cultures précédentes.
- la carence induite survient lorsque l'azote est présent en quantité suffisante, mais la plante se trouve dans l'impossibilité d'en faire l'absorption. Les causes se trouvent

dans les conditions physico-chimiques qui prévalent dans le sol; c'est le cas:

- ✓ d'immobilisation ou de rétrogradation de l'azote dans le sol;
- ✓ d'un pH acide;
- ✓ d'antagonisme entre l'azote et le cuivre.

Les symptômes de la carence en azote se manifestent par des plantes malingres et petites (signes communs à tous les types de carence) très peu développées et de tailles courtes. Les plantes perdent leur couleur verte (symptômes communs à toutes les carences) et il y a une décoloration des feuilles qui deviennent jaunâtres du sommet à la base (chlorose de l'apex), les vieilles feuilles demeurent brunes. Une sénescence prématuée des feuilles les plus basses alors que celles se trouvant en haut de la plante restent vertes. Ces signes peuvent parfois être confondus avec un manque d'eau (RABAT, 2003).

1.2.2. Carences en éléments fertilisants autre que l'azote

D'autres éléments comme le potassium, le phosphore, le soufre, le magnésium, le calcium et les oligoéléments peuvent influer sur les réponses à l'azote dans la plante. Mais dans le cas du soufre, il ne semble pas être limitant pour les céréales BADO et *al.*, (1991). Selon RABAT (2003), dans le cas du phosphore et du potassium ces symptômes sont les suivants:

- une carence en phosphore provoque chez le maïs:
 - ✓ une croissance ralentie;
 - ✓ des feuilles vert pales et violacées ou cuivrées de l'apex à la base (souvent aussi sur les tiges);
 - ✓ une maturation lente, les plantes restant vertes plus longtemps;
 - ✓ des fruits mal formés ou grains peu remplis.
- il en est de même chez le potassium où une carence induit:
 - ✓ une croissance ralentie;
 - ✓ des plantes chétives;
 - ✓ les feuilles montrent une altération de couleur tout au long de la marge extérieure de leur sommet à la base;
 - ✓ les bords des feuilles (surtout les plus basses) jaunissent, rougissent ou brunissent, se dessèchent et meurent (Nécroses des bords des feuilles); des feuilles fanées;
 - ✓ la verse.

CHAPITRE II: GENERALITES SUR LA ZONE D'ETUDE

2.1. Présentation du cadre de l'étude

L'étude a été conduite dans la commune de Banfora (Latitude : 10°36' nord, Longitude: 4°45' ouest), située au sud-ouest du Burkina. Elle est le chef-lieu de la province de la Comoé et de la région des Cascades. Les essais ont été placés dans la station expérimentale de Banfora qui relève de la station expérimentale de la Direction Régionale de Recherches Environnementales et Agricoles de l'Ouest (DRREAO) de l'INERA.

2.2. Climat

La Comoé a un climat sud soudanien en général (FONTES et GUINKO, 1995) avec une tendance soudano-guinéenne vers l'extrême sud. Le climat est caractérisé par deux saisons : une saison humide de 7 mois qui va d'Avril à Octobre et une saison sèche de 5 mois qui va de Novembre à Mars.

Située entre les isohyètes 1000 mm et 1200 mm (CRPA, 1994), la Comoé fait partie des zones les mieux arrosées du Burkina Faso. La figure 2 illustre la variation de la pluviométrie moyenne des trente dernières années (1982-2011). La pluviométrie enregistrée pendant la saison humide 2010 a été de 1107,8 mm repartie sur 99 jours. En cette année 2011, la zone a enregistré une pluviométrie totale de 910,8 mm repartie sur 96 jours avec une baisse de 197 mm par rapport à l'année 2010. Les pluies ont débuté au mois de Janvier et le mois d'Août a enregistré la plus grande quantité de pluie reçue (230,2 mm) repartie sur 21 jours (figure 3).

Les températures moyennes mensuelles ont fluctué entre 25,9°C et 31,6°C. Le mois de Mars a été le plus chaud avec un maximum de 38,5°C tandis que celui de décembre a enregistré la plus basse température avec un minimum de 17,7°C (figure 4).

Durant cette année 2011, la durée d'ensoleillement a oscillé entre une moyenne de 6,0 heures et 10,1 heures (figure 5) tandis que l'hygrométrie a fluctué entre 25% et 87% (figure 6).

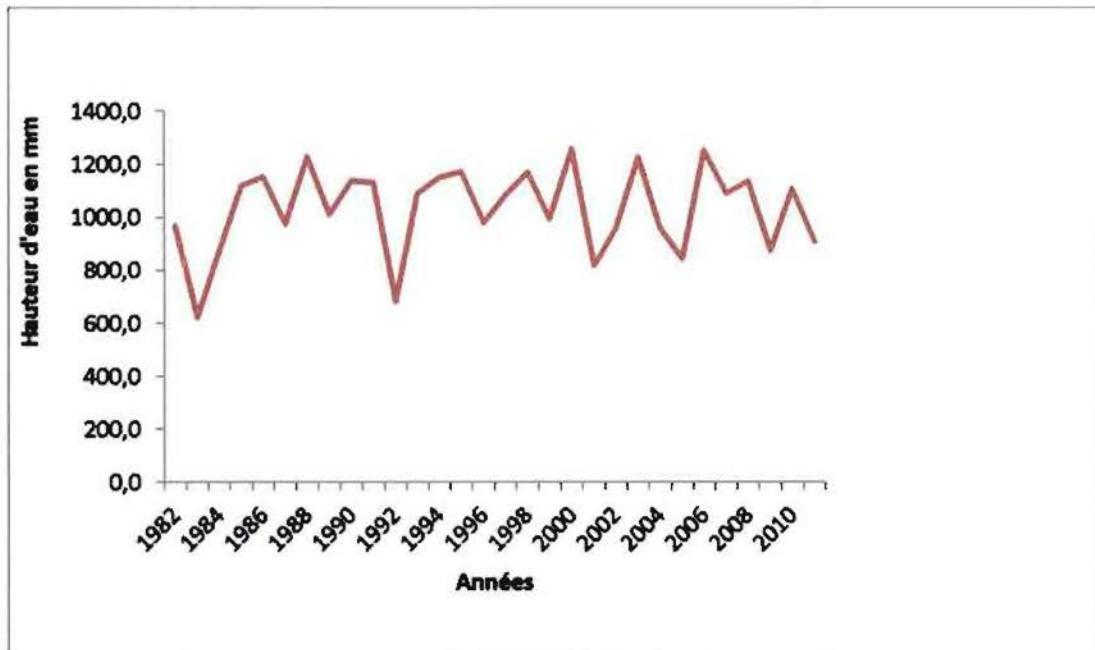


Figure 2: Variation de la pluviométrie moyenne annuelle (en mm) de Banfora de 1982-2011.

Source: SN SOSUCO

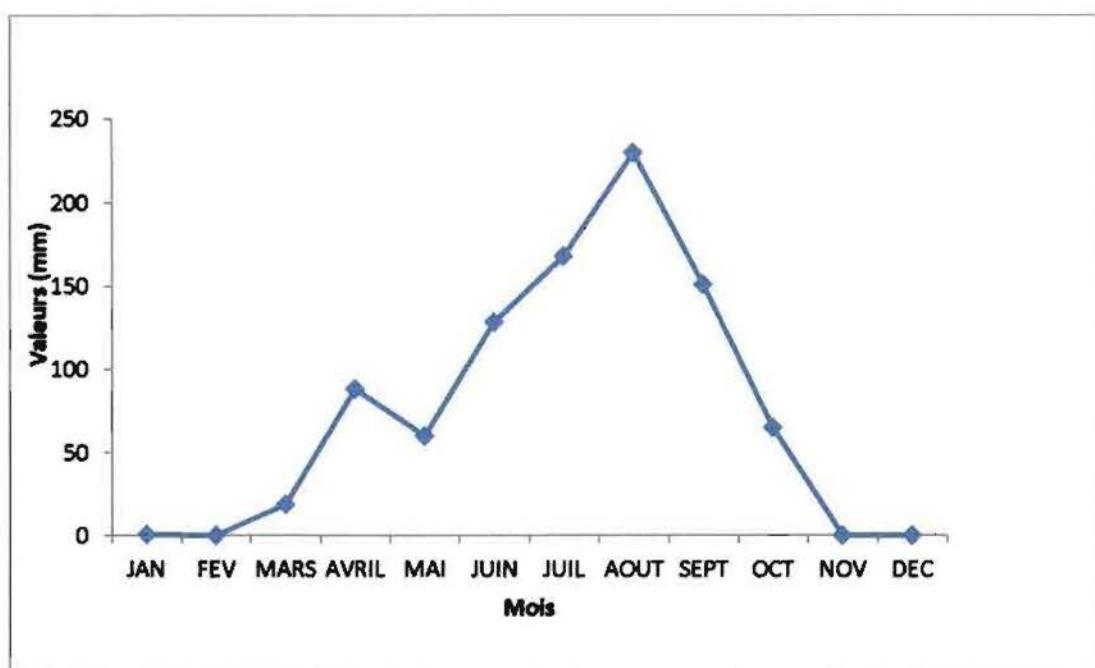


Figure 3: Pluviosité mensuelle (en mm) de Banfora au cours de la saison humide 2010-2011.

Source: SN SOSUCO (2011)

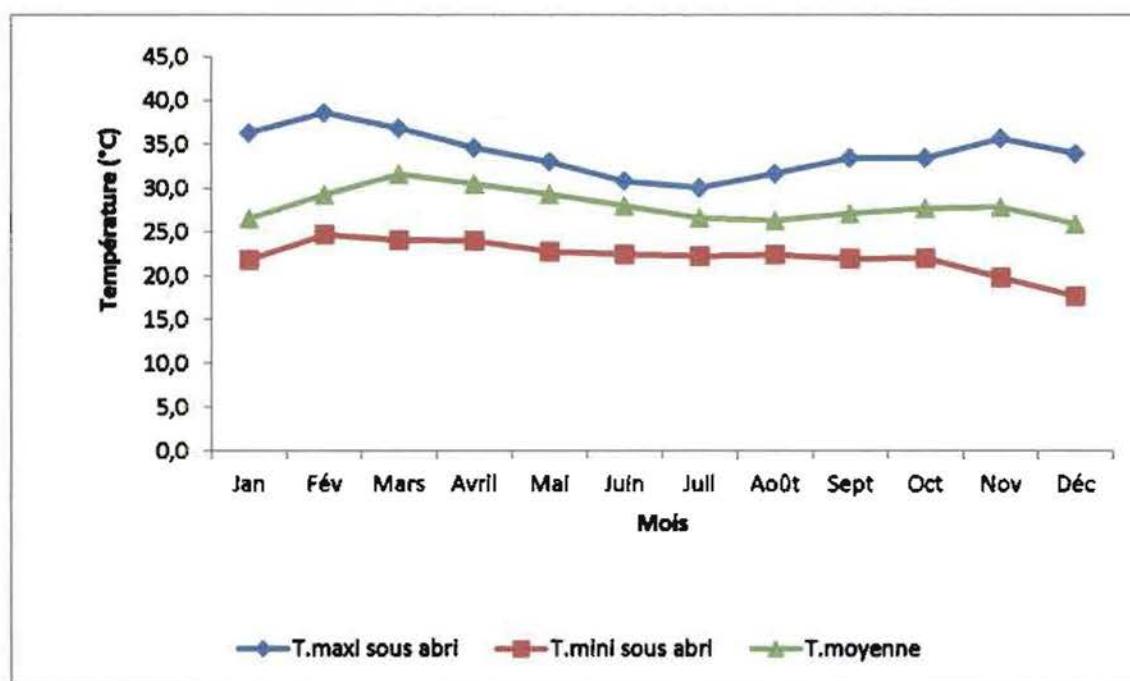


Figure 4: Température moyenne mensuelle (en °C) du site de Banfora durant l'année 2011.

Source: SN SOSUCO (2011)

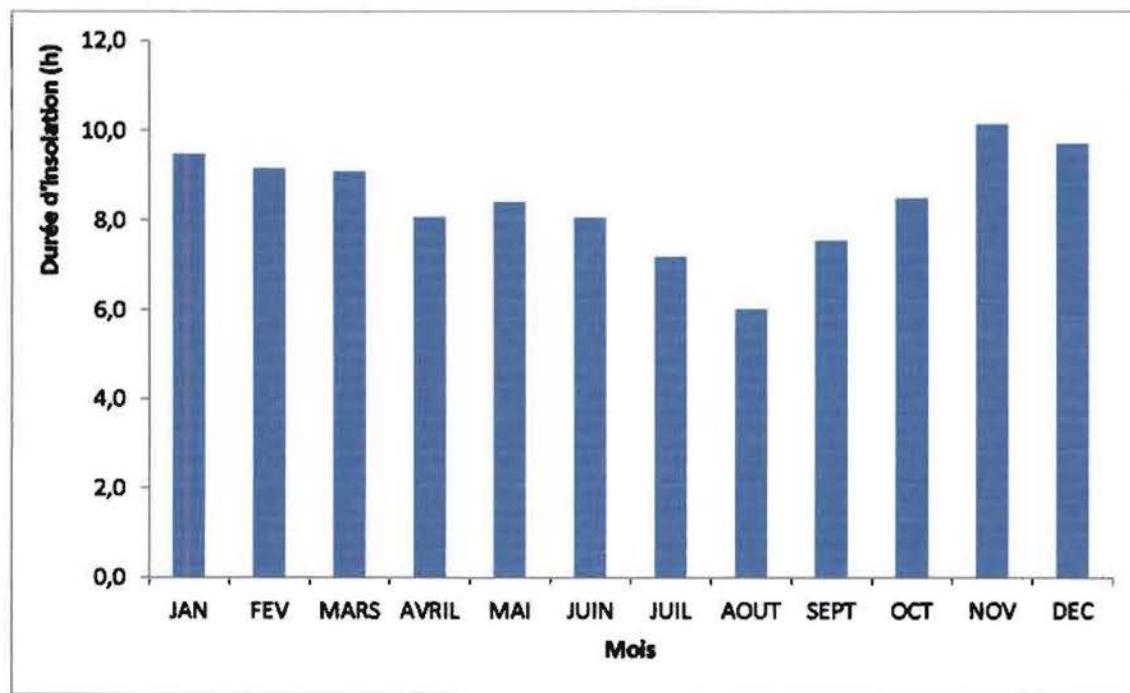


Figure 5: Durée d'insolation moyenne (en heures) à Banfora durant l'année 2011.

Source: SN SOSUCO (2011)

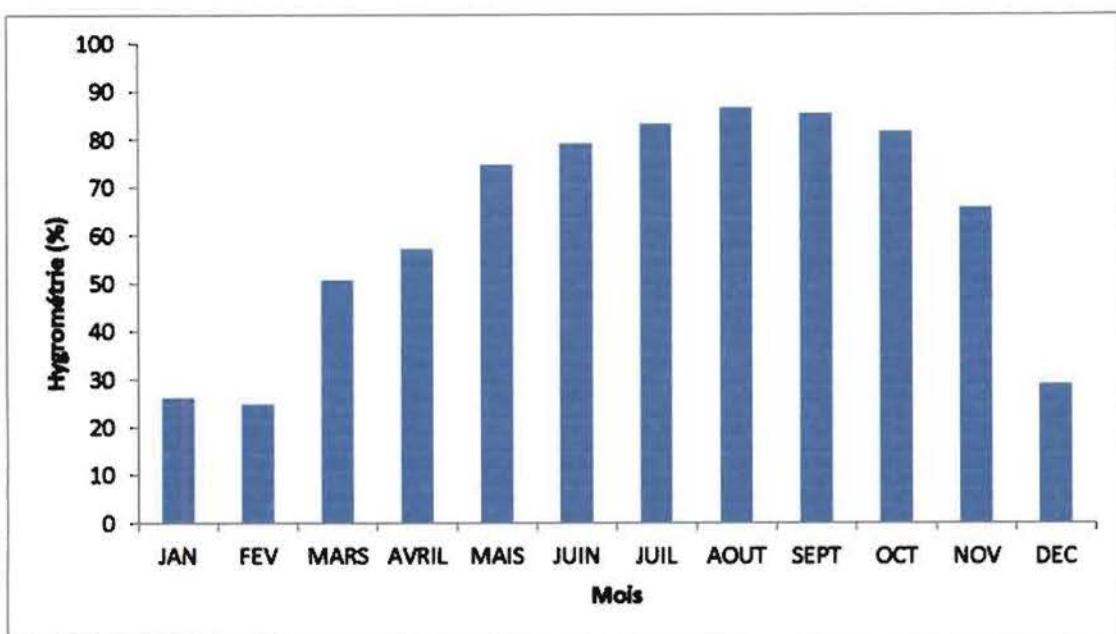


Figure 6: Humidité relative moyenne mensuelle (en %) du site de Banfora durant l'année 2011.

Source: SN SOSUCO (2011)

2.3. Végétation

Le secteur sud-soudanien décrit par FONTES et GUINKO (1995) auquel appartient la localité de Banfora est caractérisé par les formations forestières les plus denses du pays. Les formations végétales sont très composites. La végétation ligneuse, arborée ou arbustive est composée d'essences telles que: *Acacia polyacantha subsp. Campylacantha*, *A. sieberiana*, *Anogeissus leiocarpus*, *Burkea africana*, *Butyrospermum parkii*, *Cussonia barteri*, *Daniellia oliveri*, *Diospyros mespiliformis*, *Isoberlinia dalzielii*, *Khaya senegalensis*, *Kigelia africana*, *Parkia biglobosa*. A cette liste non exhaustive, s'ajoute des espèces guinéennes telles: *Cola laurifolia*, *Manilkara multinervis* et *Elaeis guineensis* et des espèces plus guinéennes, souvent associées au réseau hydrographique: *Antiaris africana*, *Antidesma venosum*, *Carapa procera*, *Chlorophora excelsa*, *Dialium guineense*, *Monodora tenuifolia*, *Monotes kerstingii*, *Pandanus candelabrum*, *Voacanga africana*.

Le tapis herbacé dominé par des espèces telles *Andropogon gayanus*, *Andropogon spp*, *Loudetia togoensis* etc. profite aux éleveurs qui pratiquent toujours un pastoralisme à caractère extensif et transhumant. A coté des formations végétales naturelles, il existe des formations anthropiques peuplées par des parcs à agrumes, *anacardium sp*, *mangifera indica*, etc.

2.4. Sols

Le sol du site est de type ferrugineux tropical lessivé induré peu profond. Le tableau II regroupe les caractéristiques physico-chimiques des horizons superficiels.

Les caractéristiques physico-chimiques montrent que le sol est de texture sablo-limoneuse. Il est pauvre en argile. Le taux de MO est compris entre 0,4 à 0,6 %. La CEC varie en fonction des horizons, elle est comprise entre 2,5 à 2,7%. Ce sol est acide (pH compris entre 5,7 à 5,8).

Tableau II: caractéristiques physico-chimiques des sols des sites des essais à la station de Banfora

| Horizon (cm) | 0-10 | 10-20 | 20-30 |
|---------------------|-------|-------|-------|
| Sable (%) | 86,2 | 84,7 | 82,0 |
| Limon (%) | 9,4 | 9,8 | 11,0 |
| Argile (%) | 4,4 | 5,5 | 6,9 |
| Total-N(%) | 0,041 | 0,036 | 0,030 |
| C.Org(%) | 0,6 | 0,5 | 0,4 |
| Total-P(%) | 0,071 | 0,010 | 0,067 |
| P Bray 1(mg/kg) | 4,0 | 2,7 | 2,4 |
| Ca+ (cmol/kg) | 1,1 | 0,9 | 0,8 |
| Mg+ (cmol/kg) | 0,4 | 0,4 | 0,4 |
| Na+ (cmol/kg) | 0,1 | 0,1 | 0,1 |
| K+ (cmol/kg) | 0,2 | 0,2 | 0,1 |
| CEC-Ag (cmol/kg) | 2,7 | 2,7 | 2,5 |
| pH-H ₂ O | 5,7 | 5,7 | 5,8 |
| pH-KCl | 5,0 | 4,9 | 4,7 |

Source : IFDC (2010)

CHAPITRE III : MATERIEL ET METHODES

3.1. Matériel

3.1.1. Matériel végétal

La variété Massongo de maïs a été utilisée. C'est une variété à cycle intermédiaire de 97 jours. Le tableau III présente les caractéristiques de la variété et la zone de recommandation.

Tableau III: Caractéristiques de la variété de maïs étudiée.

| Variété | Couleur du grain | zone (mm pluie) | Semis Flo-Mâle JAS | Semis Flo-Mâle JAS | Rendement Potentiel T/ha | source |
|----------|------------------|-----------------|--------------------|--------------------|--------------------------|--------------|
| Massongo | Blanche | >900 | 58 | 97 | 3,8 | SANOU (2003) |

3.1.2 .Fertilisants utilisés

Les fertilisants utilisés sont composés d'une fumure minérale et d'une fumure organique.

Fumure minérale

Les engrains minéraux apportés sont composés de l'urée (46% de N), du TSP (46% de P₂O₅), du KCl (60% de K₂O) et de l'engrais complexe NPKSB de formule 14-23-14-6-1.

Fumure organique

La matière organique utilisée est constituée par de fientes de poules pondeuses bien décomposées prélevées dans la ferme KUNA située à 5 km de Banfora sur l'axe Banfora-Sidéradougou. Le tableau IV donne les caractéristiques chimiques de la fiente.

Tableau IV: Caractéristiques chimiques de la fiente

| Azote total | Phosphate total | Potassium total |
|-------------|-----------------|-----------------|
| % N | % P | % K |
| 0,56 | 0,24 | 0,85 |

Source: IFDC (2010)

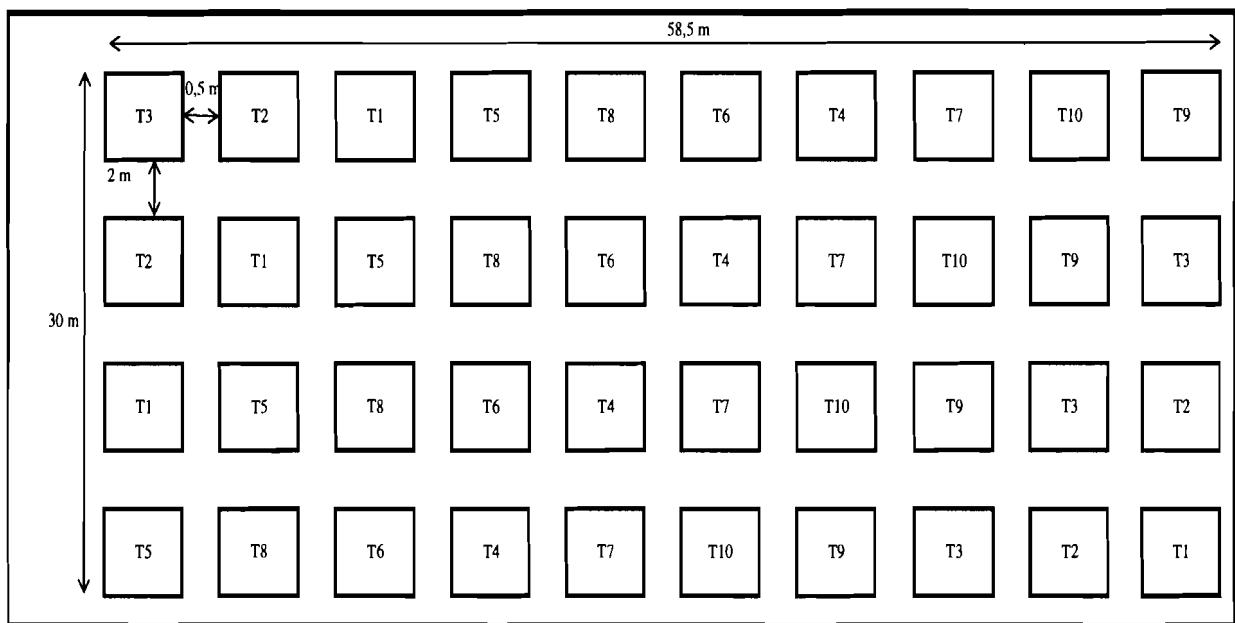
3.2. Méthodes

3.2.1. Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental utilisé est un bloc de Fisher (figure 7). La superficie totale de l'essai est de 1755 m² (58,5 m x 30 m). Elle est divisée en quatre (04) répétitions ou blocs séparées par des allées de 2 m. Sur la parcelle expérimentale, les traitements ont été installés sur des parcelles élémentaires de 25 m² (5 m x 5 m). Les parcelles élémentaires sont séparées par des allées de 0,5 m. Dix (10) traitements ont été constitués par des combinaisons des éléments N, P, K et de la matière organique (MO). Ces traitements se présentent comme suit:

- T1 : Témoin absolu=N0P0K0
- T2 : Un témoin avec MO=N0P0K0+MO
- T3 : Témoin vulgarisation=N60P10K12
- T4 : Témoin semi-intensif=N97P20K48
- T5 : Témoin intensif=N111P30K60
- T6 :Option1=N80P30K40
- T7 :Option2=N90P30K40
- T8 :Option3=N100P30K40
- T9 :Option4=N110P30K40
- T10 :Option5=N120P30K40

Pour chaque traitement, les apports de fond (NPK) ont été faits au 15è JAS alors que ceux de l'urée ont été faits en deux (02) fractions: 2/3 au 15è JAS et 1/3 au 45è JAS à partir du T4 jusqu'au T10. Quant au T3, la dose recommandée par la vulgarisation; la quantité d'azote a été appliquée en une seule fois; au 15è JAS. La MO a été appliquée 4 jours avant le semis à la dose de 2,5 T/ha. Les doses d'engrais ont été appliquées de façons différentes afin de déterminer le traitement optimal.



Superficie totale = 1755 m²

Figure 7: Schéma du dispositif expérimental.

3.2.2. Conduite de l'essai

3.2.2.1. Préparation du sol

La préparation du sol a consisté en un labour à plat effectué par un tracteur à une profondeur d'environ 20 cm. La préparation du lit de semis a été faite par un pulvérisage.

3.2.2.2. Semis

Le semis a été fait manuellement avec un espacement de 0,80 m entre les lignes et 0,40 m sur les lignes. Dans chaque parcelle élémentaire, on avait 7 lignes et sur chaque ligne, 13 poquets, trois à quatre graines ont été semées par poquet. Lors du démarriage, deux (02) plants de maïs ont été laissés par poquet, soit une densité de semis de 62500 plants/ha.

3.2.2.3. Entretien

L'entretien des essais a consisté essentiellement en de sarclages et en l'apport de la fumure organique et minérale. Aucun traitement phytosanitaire n'a été effectué.

Le premier sarclage a été effectué deux semaines après semis et le deuxième a été réalisé à 6 semaines après semis.

La fumure organique a été apportée 4 jours avant le semis. La fertilisation minérale a consisté à apporter du phosphore sous forme de super triple phosphate et du potassium sous forme de chlorure de potassium 2 semaines après semis. L'azote a été apporté sous forme d'urée en deux fractions ; une première fraction 2 semaines après semis et la deuxième fraction un mois

plus tard suivi du buttage (annexe 4).

3.2.2.4. Paramètres mesurés

Les mesures ont concerné une parcelle utile de 19,32 m² (4,2 m x 4,6 m) déterminée à l'intérieur de chaque parcelle élémentaire en éliminant une ligne de bordure de chaque côté et un poquet à chaque bout.

Les composantes du rendement mesurés sont: le nombre de plants, le nombre d'épis, le poids épis, le poids paille sèche, et le poids de 1000 grains. Le nombre de plants a été déterminé à 107 JAS par comptage sur la parcelle utile. A la récolte, le poids épis, le poids paille sèche, le rendement grain ont été évalués à l'aide d'un peson de portée 20 kg. Le poids de 1000 grains a été évalué à l'aide d'une balance numérique.

3.2.3. Méthodologie de calibrage et d'évaluation du modèle DSSAT

- Calibrage :

Le calibrage d'un modèle consiste à ajuster les valeurs des paramètres pour que les sorties du modèle correspondent aux valeurs expérimentales obtenues sur le champ ou au laboratoire. Ce calibrage se fait dans des conditions climatiques et édaphiques bien déterminées; ce qui fait que, à ce stade, le modèle calibré n'a de valeur prédictive que locale (DZOTSI, 2002).

- Evaluation et validation :

L'évaluation d'un modèle consiste à procéder à des tests dans des conditions de sol, de climat et de cultures différentes; ceci après calibrage et vérification. La vérification d'un modèle se réfère à la reproductivité par le modèle à 95% près des données ayant servi à son développement (ADDEN, 2005).

La validation d'un modèle est un test de la performance de celui-ci par rapport aux objectifs de son développement (ADDEN, 2005).

Selon DZOTSI (2002), la validation désignera la phase de généralisation du modèle consistant à établir les lois de variation des paramètres en fonction du type de sol, du mode de culture et du climat.

3.2.3.1. Calibrage du modèle DSSAT

Pour fonctionner, ce modèle requiert un minimum de données d'entrées qui peuvent se regrouper en trois catégories : les données climatiques journalières, les informations sur le site (la latitude, la longitude, l'altitude, les propriétés physiques, chimiques et morphologiques du sol, les précédents culturaux), les informations relatives à la gestion des cultures telles que la labour, la densité de semis, le type de semis, le nombre de plants au mètre carré, la

profondeur de semis, l'application d'engrais et les coefficients génétiques des cultivars déterminés à partir de leurs paramètres physiologiques et les rendements grains. Ces données permettent au modèle d'avoir une idée sur les conditions réelles de culture de la plante pour pouvoir imiter le comportement de celle-ci dans la réalité.

- Climat :

Les données climatiques journalières (la température maximum, la température minimum, la précipitation, l'insolation) sur 32 années (1980 à 2011) ont été collectées auprès de la station météo de la SN-SOSUCO. La durée d'insolation a été convertie en radiation solaire par le programme *Weatherman* de DSSAT.

- Sol :

Un sol ferrugineux tropical lessivé induré profond a été utilisé. Les caractéristiques du profil du sol sont en annexe 3.

- Dispositif :

Le dispositif expérimental du terrain a été décrit dans le modèle DSSAT (annexe 2).

- Variété :

La variété de maïs utilisée a été calibrée en utilisant l'estimateur de coefficient génétique Glue. Ainsi, les données du cycle semis-floraison et semis-maturité, rendement potentiel (le rendement obtenu en station de recherche lorsque toutes les conditions sont réunies en référence aux informations fournies par les fiches techniques de l'INERA) ont été ajustés aux résultats de simulation. Ces paramètres ont été utilisés pour simuler les conditions d'essais (climat, sols, année) et ont servi à l'évaluation du modèle.

3.2.3.2. Simulation de scénarios de gestion d'eau et des nutriments pour la production de maïs

Le scénario étudié concerne les combinaisons optimales de N, P et K pour la production du maïs (tableau V). Le type de production simulé a concerné une production de Maïs limitée par l'eau et les nutriments (NPK) en conditions pluviale.

Les scénarios ont été simulés suivant les conditions initiales décrites en se référant aux connaissances sur les modes de gestion des cultures sur le site de production. Le pas de simulation est une journée. La simulation est faite pour une année.

3.2.3.3. Données de sortie de simulation

A la sortie de la simulation, le modèle estime les paramètres phénologiques (anthèse, cycle semis-maturité) le rendement et les composantes de rendement (grain, biomasse,

biomasse totale) ainsi que d'autres paramètres. Le rendement grain, la biomasse produite (poids paille + poids rafle) et la biomasse totale (poids paille + poids épis) simulés par le modèle sont mis en parallèle avec les données mesurées pour évaluer la performance du modèle.

3.2.3.4. Evaluation du modèle

Les données mesurées lors des expérimentations ont été utilisées pour évaluer la performance de prédiction du modèle. Pour cela, nous avons utilisé dans la présente étude un certain nombre d'outils qui nous ont permis d'explorer l'aptitude du modèle à simuler la réponse des principales variables par rapport aux traitements testés. Il s'agit : la ligne 1:1 et les statistiques que sont: le coefficient de détermination R^2 , l'erreur moyenne de prédiction (RMSE), l'erreur moyenne normalisée (NRSME), la différence moyenne et le ratio entre les moyennes observées et simulées.

La ligne 1:1 est la droite d'équation $y = x$; c'est - à - dire celle sur laquelle se retrouvent les points représentant des simulations ayant coïncidées avec les observations.

Si le modèle était un bon prédicteur, et s'il n'y avait pas d'erreur expérimentale, tous les points devraient reposer sur la ligne 1:1. Une surestimation des valeurs par le modèle rapprochera les points de l'axe des valeurs simulées alors qu'une sous estimation des valeurs éloignera les points de cet axe et les placera au delà de la ligne 1:1.

Le coefficient de corrélation linéaire R est une mesure du degré d'association linéaire entre deux variables. Les valeurs de R sont comprises entre -1 et 1 avec les extrêmes indiquant une parfaite association linéaire et la valeur symétrique 0 signalant qu'il n'y a aucune association linéaire entre les variables. Une valeur intermédiaire de R indique la proportion de l'une des variables qui peut expliquer la variation linéaire de l'autre (GOMEZ et GOMEZ, 1984). Une valeur élevée de R impliquera que les points sont aussi rapprochés que possible de la ligne 1:1. Dans la comparaison d'une série de valeurs simulées avec une série observée, on recherche le maximum d'association linéaire possible. Lorsque la valeur calculée de R^2 est assez élevée (supérieure à 0,5), l'utilisation de la ligne 1:1 comme base de comparaison donnera une évidence visuelle du degré d'association entre les deux séries de valeurs. Mais lorsque la valeur de R^2 est faible (inférieure à 0,5), la comparaison directe basée sur la ligne 1:1 peut mener à des interprétations erronées en particulier lorsque d'autres sources incontrôlables d'erreur sont en jeu.

L'erreur moyenne de prédiction (RMSE) représente la distance moyenne entre les simulations et les mesures (KOBAYASHI et US SALAM, 2000 ; DU TOIT *et al.*, 2001). Plus

concrètement elle est l'écart moyen qui sépare une valeur simulée quelconque de son équivalent mesuré. L'avantage de l'utilisation du RMSE est qu'elle permet d'apprécier directement en unité de la variable mesurée, le degré de divergence globale entre les simulations et les observations. Plus, le RMSE est faible, plus la simulation du modèle est meilleure.

L'erreur moyenne normalisée de prédiction NRMSE est le ratio entre le RMSE et la moyenne observée multipliée par 100. La performance du modèle est excellente quand la valeur de NRSME est comprise entre 0-10, elle est bonne quand elle se trouve entre 11-20, acceptable lorsqu'elle est comprise entre 21-30 et est mauvaise quand elle est supérieure à 30 (JAMIESON *et al.*, 1991).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (si - mi)^2}$$

$$NRMSE = \frac{RMSE}{Moyenne observée}$$

Où si et mi représentent respectivement les valeurs simulées et mesurées.
n représente le nombre de traitement.

3.2.3.5. Application du modèle DSSAT : Analyse saisonnière

Le dispositif expérimental a été décrit dans le modèle DSSAT afin de déterminer sur une période allant de 1980 à 2011 (32 ans), le meilleur traitement. Dans ce type d'analyse, seules les variations du climat sont prises en considération, les autres données restant inchangées. Les meilleurs traitements sont ceux qui présentent une bonne moyenne et une faible variabilité sur les 32 ans.

L'analyse saisonnière est l'analyse de la performance de l'effet des traitements sur la croissance et le développement d'une culture sur un certain nombre d'années. Elle a deux composantes. La première composante est l'analyse biophysique qui détermine le minimum et le maximum des rendements et leur variance pour les traitements. La deuxième composante est l'analyse stratégique et financière qui nécessite pour son utilisation les données économiques. Cette analyse traite les revenus monétaires des rendements des traitements. Elle aboutit au choix du meilleur traitement efficient à l'aide du coefficient de la moyenne de Gini (un outil d'aide à la décision économique intégré dans le système DSSAT). Cette analyse financière est faite par introduction dans le modèle des coûts de production (coûts des engrains

et de leur application) et des prix de vente du maïs (Tableau V). Le prix de vente du maïs considéré a été déterminé en calculant la moyenne à partir des différentes variations de prix qu'a connue le maïs au cours de l'année dans la zone d'étude. Les autres coûts de production du maïs à savoir le prélèvement des échantillons de sols, les travaux de préparation du terrain (nettoyage de la parcelle, défrichement, labour, pulvérisage, piquetage), le suivi de l'essai (gardiennage de l'essai), le semis, le sarclage, le buttage, la récolte et les opérations post-récoltes (coupe et pesée des tiges, despatherage, battage et vannage, comptage et pesée grains) sont identiques pour tous les traitements ; raison pour laquelle nous n'en n'avons pas tenu compte dans le calcul de rentabilité.

Tableau V : Prix de vente et coûts de production de maïs dans la zone d'étude

| | |
|-----------------------------------|-------|
| Prix de vente (F CFA/kg) | 158 |
| Coûts des intrants | |
| Semences (F CFA/kg) | 1500 |
| Valeurs de N (F CFA/kg) | 587 |
| Valeurs de P (F CFA/kg) | 739 |
| Valeurs de K (F CFA/kg) | 1250 |
| Amendements organiques F CFA/kg | 24 |
| Coûts d'application des intrants | |
| N (F CFA/ha) | 37989 |
| P (F CFA/ha) | 18991 |
| K (F CFA/ha) | 18991 |
| Amendements organiques (F CFA/ha) | 58980 |

3.2.4. Analyse des données

Les données ont été saisies et validées dans le tableur Excel. L'analyse de variance a été faite conformément au dispositif avec le logiciel de statistique générale Genstat Discovery Version 4. La séparation des moyennes a été faite par le test de Student-Newman-Keuls au seuil de 5%.

Les simulations ont été faites avec le modèle agronomique DSSAT v4.5 aussi bien pour le calibrage que pour l'évaluation.

CHAPITRE IV: RESULTATS ET DISCUSSION

4.1. Effets des doses d'engrais sur les composantes de rendement du maïs

4.1.1. Résultats

Les traitements n'induisent pas de différences significatives au seuil de 5% sur le nombre de plants/ha. Par contre, leurs différences sont très hautement significatives pour le rendement paille, le nombre d'épi, le poids des épis, le poids de 1000 grains et le rendement grain au seuil de 5% (tableau VI).

Pour le nombre de plants, l'analyse de variance n'a pas révélé de différence significative entre les différents traitements au seuil de 5% (tableau VI). Les rendements observés ne sont donc pas liés au nombre de plants.

Le traitement T8 de formule N100P30K40 donne le nombre d'épi le plus élevé (45160 épis/ha). Ce traitement ne diffère pas significativement des traitements autres traitements (T4, T5, T6, T7, T9 et T10). Par contre ces diffèrent significativement des traitements T2 et T1 qui ont enregistré respectivement 33903 épis/ha et 28597 épis/ha.

Le poids épis le plus élevé a été enregistré sur le traitement T9 (6535 kg/ha), il est suivi du traitement T10 (6341 kg/ha). Ces deux traitements diffèrent des traitements T1 (N0P0K0), T2 (N0P0K0+MO) et T3(N60P10K12). Les traitements T9(N110P30K40) et T10 (N120P30K40) ne diffèrent pas significativement des traitements T4(N97P20K48), T5(N111P30K60), T6(N80P30K40), T7(N90P30K40) et T8(N100P30K40), (tableau VI).

Le traitement T10 donne le poids de 1000 grains le plus élevé (304,1 g), il est suivi du traitement T9 (301,7 g). Ces deux traitements diffèrent des traitements T1 et T2. Cependant ces traitements ne diffèrent pas significativement des autres traitements (tableau VI).

Le meilleur rendement grain a été observé sur le traitement T9 avec un rendement de 4661 kg/ha. Il est suivi du traitement avec 4574 kg/ha. Ces traitements diffèrent significativement des traitements T3, T2 et T1 (tableau VI).

La plus forte quantité de paille (6069 kg/ha) a été obtenue sur le traitement T9 (N110P30K40). Il est suivi du T4 (N97P20K48) avec 5732kg/ha. Ces traitements diffèrent significativement des traitements T2 (N0P0K0+MO) et T1 (N0P0K0) (tableau VI).

Tableau VI: Effet des traitements sur les composantes de rendement du maïs

| Traitement | Nombre de plants/ha | Nombre d'épi (ha) | Poids épis (kg/ha) | Poids de 1000 grain (g) | Rendement grain (kg/ha) | Rendement paille (kg/ha) |
|---------------|---------------------|---------------------|--------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|
| N0P0K0 | 47619 | 28597 ^e | 1566 ^d | 231,4 ^d | 1152 ^d | 2006 ^d |
| N0P0K0+MO | 46972 | 33903 ^{cd} | 2342 ^d | 257,4 ^c | 1671 ^d | 4076 ^c |
| N60P10K12 | 47360 | 39208 ^{ab} | 3804 ^c | 273,3 ^{ab} | 2769 ^c | 4464 ^{ab} |
| N97P20K48 | 48395 | 44384 ^a | 5603 ^{ab} | 289,3 ^a | 4015 ^{ab} | 5732 ^{ab} |
| N111P30K60 | 43737 | 42055 ^a | 5234 ^{ab} | 293,8 ^a | 3715 ^{ab} | 5280 ^{ab} |
| N80P30K40 | 46584 | 43996 ^a | 5383 ^{ab} | 291,1 ^a | 3863 ^{ab} | 5137 ^{ab} |
| N90P30K40 | 46713 | 43737 ^a | 5474 ^{ab} | 296,7 ^a | 3830 ^{ab} | 5098 ^{ab} |
| N100P30K40 | 47490 | 45160 ^a | 5590 ^{ab} | 297,3 ^a | 4027 ^{ab} | 5344 ^{ab} |
| N110P30K40 | 46454 | 44125 ^a | 6535 ^a | 301,7 ^a | 4661 ^a | 6069 ^a |
| N120P30K40 | 47748 | 43866 ^a | 6341 ^a | 304,1 ^a | 4574 ^a | 5409 ^{ab} |
| probabilité | 0,446 | <0,001 | <0,001 | <0,001 | <0,001 | <0,001 |
| signification | NS | THS | THS | THS | THS | THS |

Les moyennes affectées d'une même lettre dans une même colonne ne sont pas significativement différentes au seuil de 5% par la méthode de Student-Newman-Keuls.

THS = Très Hautement Significatif ($p < 0.001$)

NS = Non Significatif

4.1.2. Discussion

Les résultats ont montré que le nombre de plants ne diffère pas significativement en fonction des traitements. Ces résultats montrent que les différences de rendements observées ne sont pas liées au nombre de plants. Ainsi le nombre de plants à l'hectare dépend des conditions physico-chimiques du sol et des conditions environnementales notamment les techniques culturales comme l'a aussi signalé KAMBIRE (1989). Chez le maïs; c'est en début de végétation que l'on décide de la densité de peuplement (EDZANG, 2000).

Les doses d'engrais ont un effet très hautement significatif sur les autres composantes de rendement du maïs. En effet le rendement paille, le nombre d'épi, le poids des épis, le poids de 1000 grains et le rendement grain augmentent avec les doses croissantes d'azote. Ce

qui justifie que l'azote pourrait être le facteur le plus limitant des sols pour la production agricole. Ces résultats vont dans le sens de BATIONO et *al.* (1998), selon lesquels l'azote et le phosphore constituent les principaux éléments qui limitent la productivité des sols ferrugineux tropicaux lessivés. Ces résultats confirment aussi ceux de YARO et *al.* (1997) et KABBRAH et *al.* (1996) qui ont montré que tous les paramètres de rendement augmentent avec les doses croissantes de fertilisants. Enfin ces résultats sont également en accord avec FAO (2002) et RABAT (2003).

Cependant, en comparant les options développées (T6, T7, T8, T9, T10) à celle vulgarisée, on observe que ces options sont plus productives par rapport à cette dernière; ceci implique que la fumure minérale vulgarisée (T3) ne permet pas l'expression du potentiel de la variété. Ainsi, l'insuffisance du N, P et K au niveau du traitement T3 a conduit à de très faibles productions par rapport aux options T6, T7, T8, T9 et T10. Selon certains auteurs dont DIALLO (2002), les paramètres de rendements augmentent avec les doses croissantes de fertilisants. Le traitement T3 est efficace par rapport au témoin T1 mais il est faible par rapport aux autres traitements (T4, T5, T6, T7, T8, T9 et T10) parce qu'il apporte moins d'éléments fertilisants. Aussi, il faut noter que ces faibles productions au T3 peuvent être attribuées au type de sol sur lequel l'essai a été implanté. Les sols ferrugineux tropicaux présentent une carence en azote PIERI (1989). Un déséquilibre du milieu de cet élément ne permet pas l'expression de la culture.

Quant à l'apport exclusif du fumier, le traitement T2 (N0P0K0+MO); les résultats obtenus montrent que la dose de fumier a un effet très hautement significatif sur les composantes de rendement à l'exception du nombre de plants/ha. KABBRAH et *al.* (1996) ; YARO et *al.* (1997) en utilisant des doses de fumier de 5 à 10 t/ha ont conclu que toutes les composantes de rendement sont influencées par les doses de fumier. Or avec une quantité faible (2,5t/ha), nous obtenons des résultats similaires à l'exception du nombre de plants/ha où la dose de fumier n'a pas de différence significative. Ces résultats révèlent l'importance que revêt l'application de la matière organique pour l'amélioration des rendements.

4.2. Simulation de la croissance et du développement

4.2.1. Résultats

4.2.1.1. Calibrage du cultivar

Pour réaliser les simulations, la variété de maïs utilisée a d'abord été calibrée. Le programme utilitaire Glue de DSSAT a été utilisé à cet effet. Les résultats de calibrage des coefficients génétiques de la variété utilisée pour l'évaluation du modèle sont présentés dans

le tableau VII.

Tableau VII: Coefficients génétiques calculés pour la variété Massongo à l'aide du programme GLUE

| Coefficient | P1 | P2 | P5 | G2 | G3 | Phint |
|-------------|-----|-------|-----|-----|-------|-------|
| Valeurs | 210 | 0,600 | 750 | 650 | 10,10 | 40,00 |

- P1: chaleur cumulée depuis l'émergence jusqu'à la fin de la phase juvénile (exprimée en degré jours au-dessus d'une température de base de 8°C) où la plante n'est pas sensible aux variations de photopériode.
- P2: décalage du développement (exprimé en jours) pour chaque augmentation d'une heure de la photopériode au-dessus de la plus longue photopériode où le développement s'effectue au rythme maximum (qui est supposée être 12,5 heures)
- P5: chaleur cumulée depuis la floraison femelle jusqu'à la maturité physiologique (exprimée en degré jours au-dessus d'une température de base de 8°C).
- G2: nombre maximum de grains par plant.
- G3: taux de remplissage des grains au cours de la phase linéaire de remplissage des grains et sous des conditions optimales (mg/jour).
- PHINT: Phylochron Intervalle ; chaleur cumulée (exprimée en degré jours) entre l'apparition de la pointe de deux feuilles successives.

4.2.1.2. Evaluation de la performance du modèle

La performance du modèle CERES-MAIZE de DSSAT dans la prédiction de la croissance et du développement a été évaluée par une comparaison des données observées des essais à celles simulées par le modèle pour la saison 2011.

4.2.1.2.1. Biomasse végétale

Le tableau VIII présente différents aspects de mesure statistique quantitative qui incorpore le biais de simulation. Il ressort de ce tableau que la différence moyenne entre les valeurs simulées et observées est négative (-811) et le ratio (moyenne simulée/moyenne observée) est proche de 1 ; il est égal à 0,89. Il y a donc une sous-estimation de la biomasse par le modèle DSSAT. La valeur de R^2 est supérieure à 0,50. Malgré le degré de sous-estimation globale de la biomasse, il existe une forte corrélation entre simulations et mesures. Le coefficient de détermination est égal à 0,91. L'erreur moyenne de prédiction RMSE est de 1015,78. L'erreur moyenne normalisée de prédiction NRMSE de la biomasse observée et simulée est de 16%.

La figure 8 donne une représentation dispersée de la biomasse simulée en fonction de celle observée. La plupart des points (70%) se situent au-dessus de la ligne 1 : 1 ; ce qui indique une sous-estimation.

Tableau VIII: Comparaison entre les valeurs observées et simulées, de la biomasse produite.

| variables | biomasse observée (kg/ha) (poids paille + poids rafles) | biomasse simulée (kg/ha) (poids paille + poids rafles) |
|--------------------|--|---|
| N0P0K0 | 2420 | 2553 |
| N0P0K0+MO | 4747 | 4463 |
| N60P10K12 | 5499 | 5574 |
| N97P20K48 | 7320 | 5933 |
| N111P30K60 | 6799 | 5996 |
| N80P30K40 | 6657 | 5755 |
| N90P30K40 | 6742 | 5871 |
| N100P30K40 | 6907 | 5954 |
| N110P30K40 | 7943 | 5994 |
| N120P30K40 | 7176 | 6007 |
| moyenne | 6221 | 5410 |
| différence moyenne | -811 | |
| ratio | 0,89 | |
| RMSE | 1015,78 | |
| NRMSE | 16% | |
| R ² | 0,91 | |

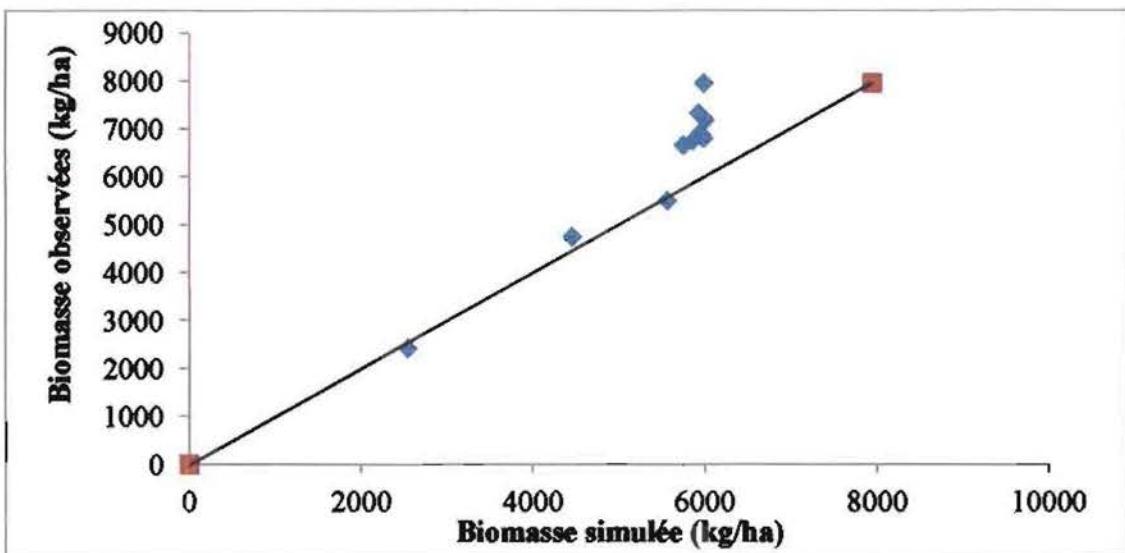


Figure 8: Représentation dispersée de la biomasse simulée en fonction de la biomasse observée.

4.2.1.2.2. Biomasse totale

Il ressort de l'analyse du tableau VIII que la différence moyenne entre les valeurs simulées et observées est négative (-221), le ratio (moyenne simulée/moyenne observée) est proche de 1; il est égal à 0,99. La valeur de R^2 est élevée (supérieure à 0,50). Malgré le degré de sous-estimation de la biomasse totale, il existe une forte corrélation entre simulations et mesures. Le coefficient de détermination est égal à 0,89. L'erreur moyenne de prédiction RMSE est de 933,36. L'erreur moyenne normalisée de prédiction NRMSE entre les rendements observés et simulés est égal à 10%. La figure 9 donne une représentation dispersée de la biomasse totale simulée en fonction de celle observée. La plupart des points (60%) se situent au-dessus de la ligne 1 : 1; la biomasse totale simulée par le modèle DSSAT est donc sous-estimée.

Tableau IX: Comparaison entre les valeurs observées et simulées, de la biomasse totale.

| variables | biomasse totale observée | | biomasse totale simulée (kg/ha) (poids paille + poids épis) |
|--------------------|--------------------------|-----------------------------|--|
| | (kg/ha) | (poids paille + poids épis) | |
| N0P0K0 | 3572 | | 3761 |
| N0P0K0+MO | 6418 | | 6832 |
| N60P10K12 | 8268 | | 9858 |
| N97P20K48 | 11335 | | 10553 |
| N111P30K60 | 10514 | | 10622 |
| N80P30K40 | 10520 | | 10337 |
| N90P30K40 | 10572 | | 10486 |
| N100P30K40 | 10934 | | 10575 |
| N110P30K40 | 12604 | | 10619 |
| N120P30K40 | 11750 | | 10635 |
| moyenne | 9649 | | 9428 |
| différence moyenne | | -221 | |
| ratio | | 0,99 | |
| RMSE | | 933,36 | |
| NRMSE | | 10% | |
| R ² | | 0,89 | |

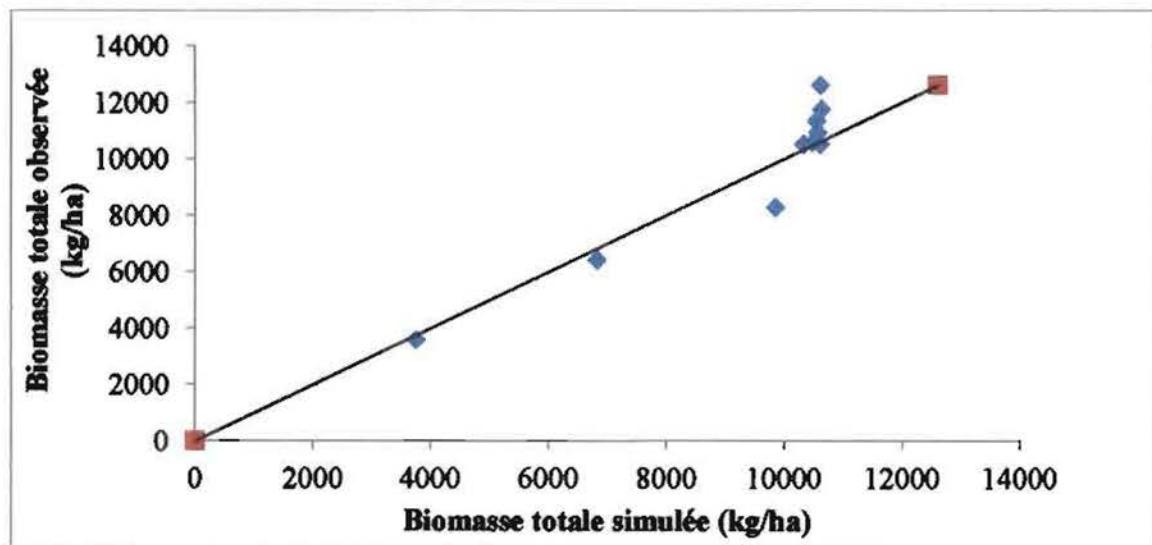


Figure 9: Représentation dispersée de la biomasse totale simulée en fonction de la biomasse totale observée.

4.2.1.2.3. Rendement grain

Le tableau VIII présente différents aspects de mesure statistique quantitative qui incorpore le biais de simulation. Il ressort de ce tableau que la différence moyenne entre les valeurs simulées et observées est positive (635) et le ratio (moyenne simulée/moyenne observée) est supérieur à 1; il est égal à 1,21. Le rendement grains simulé par le modèle DSSAT est donc surestimé. La valeur du coefficient de détermination (R^2) est élevée (supérieure à 0,50). Malgré le degré de surestimation du rendement grain, il existe une forte corrélation entre simulations et mesures. Le coefficient de détermination est de 0,85. L'erreur moyenne de prédiction RMSE est de 777,13. L'erreur moyenne normalisée de prédiction NRMSE entre les rendements observés et simulés est de 23%. La figure 10 donne une représentation dispersée du rendement grain simulé en fonction de celui observé. La plupart des points (90%) se situent en-dessous de la ligne 1 : 1; ce qui indique une surestimation.

Tableau X: Comparaison entre les valeurs observées et simulées, du rendement grain.

| variables | Rendement grain observé (kg/ha) | Rendement grain simulé (kg/ha) |
|--------------------|------------------------------------|--------------------------------|
| NOP0K0 | 1152 | 1240 |
| NOP0K0+MO | 1671 | 2412 |
| N60P10K12 | 2769 | 4331 |
| N97P20K48 | 4015 | 4667 |
| N111P30K60 | 3715 | 4673 |
| N80P30K40 | 3863 | 4629 |
| N90P30K40 | 3830 | 4661 |
| N100P30K40 | 4027 | 4669 |
| N110P30K40 | 4661 | 4672 |
| N120P30K40 | 4574 | 4675 |
| moyenne | 3428 | 4063 |
| différence moyenne | 635 | |
| ratio | | 1,21 |
| RMSE | | 777,13 |
| NRMSE | | 23% |
| R^2 | | 0,85 |

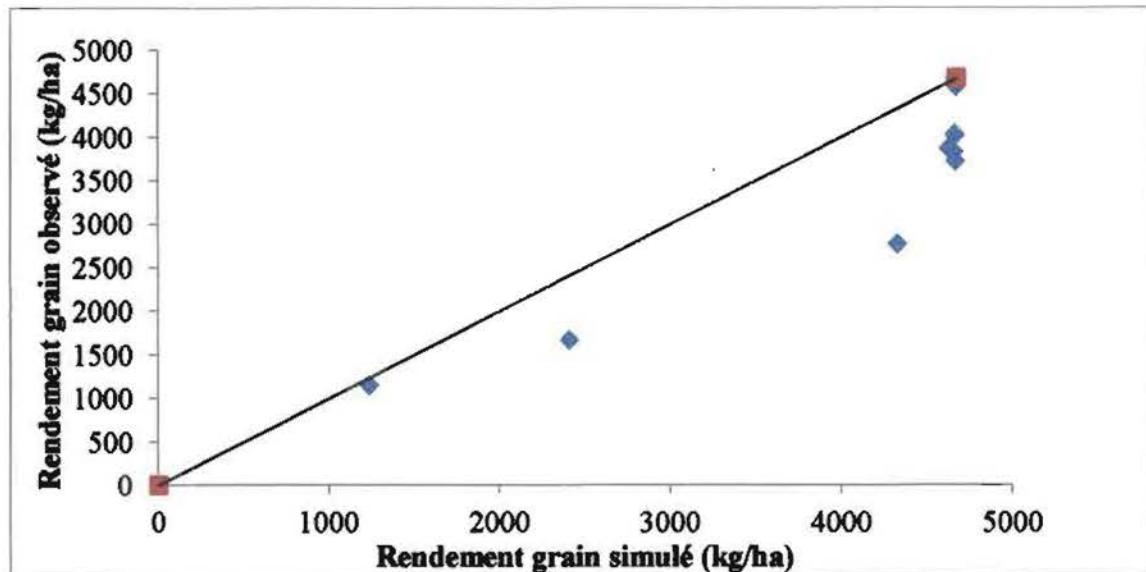


Figure 10 : Représentation dispersée du rendement grain simulé en fonction du rendement grain observé.

4.2.2. Discussion

Les résultats obtenus à l'issue de la simulation par le modèle DSSAT montrent que les rendements et ses composantes (biomasse produite, biomasse totale) sont fonction des traitements (doses d'engrais).

Le modèle a généralement sous-estimé la biomasse. La comparaison entre les résultats observés et simulés (Tableau VIII) a donné une valeur de $R^2 = 0,91$. Cette valeur est en accord avec la méthode d'évaluation de la performance du modèle donnée par WILMOTT et al. (1985) et WALLACH et GOFFINET (1987). De plus, la valeur du NRMSE est de 16% pour tous les traitements. Le NRMSE est dans l'intervalle de prévisions de la bonne performance du modèle proposé par JAMIESON et al. (1991) et LOAGUE et GREEN (1991).

La biomasse totale a été sous-estimée par le modèle. En effet, la comparaison entre les résultats observés et simulés a donné une valeur de $R^2 = 0,89$. Cette valeur est proche de 1 et confirme la méthode d'évaluation de la performance du modèle donnée par WILMOTT et al. (1985) et WALLACH et GOFFINET (1987). Le NRSME pour l'ensemble des traitements est égal à 10%. Cette valeur est comprise dans l'intervalle de prévisions donné par JAMIESON et al. (1991) et LOAGUE et GREEN (1991); ce qui confirme la bonne performance du modèle selon ces auteurs.

Le modèle a généralement surestimé le rendement grain. La valeur de R^2 pour l'ensemble des traitements est égale à 0,85. Cette valeur est proche de 1. Par conséquent la

performance du modèle est bonne (WILMOTT et al., 1985; WALLACH et GOFFINET, 1987). Le NRMSE entre les rendements grains observés et simulés est égal à 23%. Selon JAMIESON et al. (1991) et LOAGUE et GREEN (1991), cette valeur est dans l'intervalle acceptable. Pour ces auteurs, cela confirme également la performance du modèle à simuler le rendement.

Cependant, le modèle est très sensible aux doses d'engrais. En effet la simulation des rendements pour les traitements ayant peu ou pas d'engrais en particulier N a été mauvaise par rapport aux traitements ayant un taux d'engrais élevé. Ces résultats sont en accord avec ceux de NURREDEEN (2011).

4.2.3. Application du modèle DSSAT à l'évaluation pluriannuelle des traitements

En vue de prendre en compte l'effet du climat sur trente ans, le programme d'analyse saisonnière du système DSSAT a été utilisé pour l'analyse des résultats des simulations. A cet effet, les simulations ont été étendues à 32 années afin d'examiner le comportement des différents traitements dans un environnement changeant d'une année à l'autre et dont le déterminisme est encore mal connu pour le type de sol utilisé. Le Tableau XI donne les rendements grain en fonction des traitements sur la période 1980-2011. La figure 11 représente la variabilité du rendement grain sur une période de 32 ans issue de l'analyse biophysique. Les résultats obtenus montrent que le rendement varie en fonction des doses de fertilisants d'une année à l'autre. Les traitements T1 et T2 présentent moins de variabilité. Cependant, les rendements moyens de ces traitements sont faibles (1,5 T/ha). La dose vulgarisée T3 présente des valeurs extrêmes. Pour les autres options; T6, T7, T8, T9, T10, qui donnent des meilleurs rendements, le traitement T6 présente la plus faible variabilité.

L'analyse financière relative au revenu monétaire du maïs par hectare avec l'efficience des différents traitements (formules d'engrais) durant la période de 1980 à 2011 est présentée par le Tableau XII. Les résultats d'analyse (tableau XII) donnent le traitement T6 de formule N80P30K40 comme le traitement qui présente le meilleur revenu monétaire par hectare et la meilleure efficience.

Tableau XI : Rendement grain simulés en fonction des traitements de 1980-2011

| | T1 | T2 | T3 | T4 | T5 | T6 | T7 | T8 | T9 | T10 |
|-------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Année | (kg/ha) |
| 1980 | 1312 | 1204 | 1793 | 2040 | 2775 | 2986 | 2904 | 2866 | 2779 | 2707 |
| 1981 | 1326 | 1104 | 1956 | 2466 | 3073 | 3190 | 3142 | 3120 | 3087 | 3058 |
| 1982 | 1282 | 1337 | 1485 | 1938 | 2597 | 2795 | 2713 | 2670 | 2597 | 2574 |
| 1983 | 1241 | 1247 | 1327 | 1743 | 2234 | 2318 | 2303 | 2239 | 2232 | 2219 |
| 1984 | 1305 | 1377 | 1513 | 2077 | 2942 | 3155 | 3103 | 3077 | 2949 | 2875 |
| 1985 | 1159 | 985 | 1543 | 2009 | 2629 | 2828 | 2729 | 2675 | 2640 | 2618 |
| 1986 | 1183 | 1035 | 1846 | 2153 | 2925 | 3318 | 3186 | 3031 | 2933 | 2846 |
| 1987 | 1062 | 849 | 1561 | 2032 | 2858 | 2972 | 2926 | 2898 | 2863 | 2839 |
| 1988 | 1088 | 892 | 1970 | 2384 | 3030 | 3054 | 3051 | 3035 | 3030 | 3031 |
| 1989 | 1175 | 1125 | 1639 | 1984 | 2743 | 3014 | 2951 | 2893 | 2752 | 2668 |
| 1990 | 877 | 795 | 1629 | 2077 | 2717 | 2833 | 2808 | 2762 | 2717 | 2698 |
| 1991 | 992 | 803 | 1807 | 2604 | 3208 | 3351 | 3301 | 3255 | 3210 | 3164 |
| 1992 | 1176 | 1196 | 1074 | 1414 | 1839 | 1917 | 1864 | 1845 | 1843 | 1836 |
| 1993 | 1319 | 1040 | 1759 | 2290 | 3081 | 3349 | 3345 | 3223 | 3140 | 3039 |
| 1994 | 1064 | 850 | 1507 | 2065 | 2771 | 2831 | 2790 | 2783 | 2775 | 2753 |
| 1995 | 1266 | 1324 | 1551 | 1941 | 2519 | 2767 | 2624 | 2579 | 2551 | 2519 |
| 1996 | 1243 | 1295 | 1400 | 1778 | 2331 | 2413 | 2352 | 2337 | 2333 | 2320 |
| 1997 | 1216 | 1312 | 1269 | 1645 | 2148 | 2221 | 2190 | 2161 | 2147 | 2140 |
| 1998 | 1221 | 1120 | 1571 | 2018 | 2666 | 2733 | 2700 | 2676 | 2668 | 2656 |
| 1999 | 1101 | 868 | 1326 | 1740 | 2349 | 2410 | 2383 | 2366 | 2353 | 2345 |
| 2000 | 1031 | 843 | 1950 | 2411 | 3040 | 3124 | 3109 | 3093 | 3046 | 3008 |
| 2001 | 1313 | 1246 | 1569 | 2151 | 3099 | 3186 | 3172 | 3165 | 3095 | 3092 |
| 2002 | 1311 | 999 | 1940 | 2401 | 3137 | 3150 | 3142 | 3143 | 3140 | 3135 |
| 2003 | 1101 | 1031 | 1703 | 2147 | 2963 | 3071 | 3032 | 3001 | 2971 | 2934 |
| 2004 | 931 | 941 | 3551 | 4175 | 4424 | 3949 | 4143 | 4299 | 4411 | 4497 |
| 2005 | 1306 | 1326 | 1310 | 1702 | 2261 | 2403 | 2336 | 2282 | 2262 | 2235 |
| 2006 | 1144 | 1057 | 1649 | 2024 | 2694 | 2803 | 2755 | 2723 | 2696 | 2673 |
| 2007 | 1051 | 1011 | 1417 | 1719 | 2243 | 2456 | 2394 | 2320 | 2240 | 2218 |
| 2008 | 1153 | 1202 | 1845 | 2431 | 2797 | 2863 | 2855 | 2819 | 2796 | 2776 |
| 2009 | 1232 | 1344 | 1301 | 1646 | 2111 | 2142 | 2129 | 2120 | 2112 | 2065 |
| 2010 | 1204 | 1305 | 1531 | 1814 | 2263 | 2444 | 2345 | 2277 | 2264 | 2254 |
| 2011 | 1190 | 1214 | 1450 | 1774 | 2300 | 2540 | 2454 | 2370 | 2299 | 2283 |

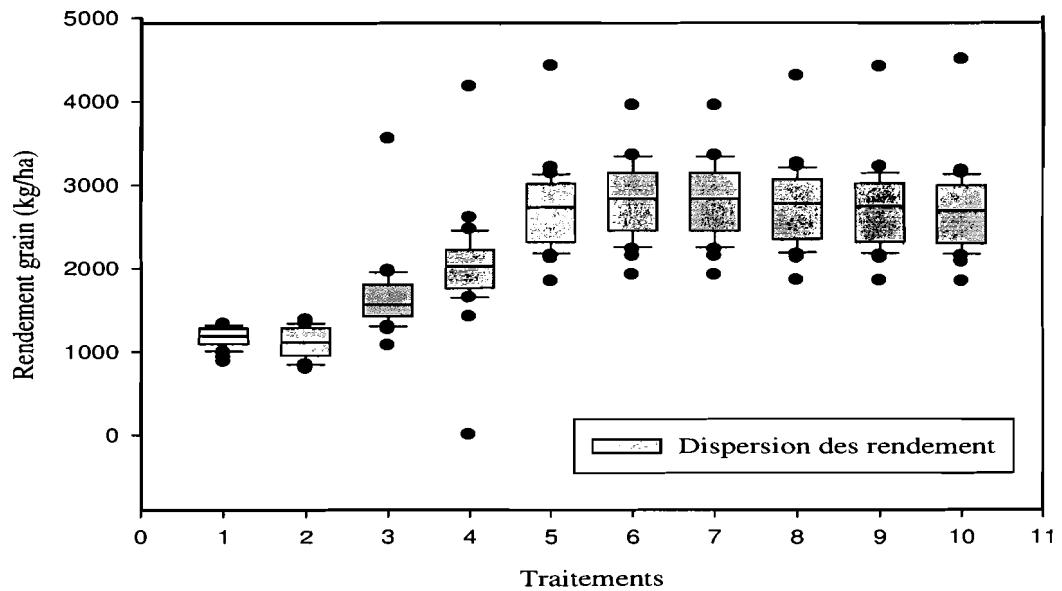


Figure11: Représentation de la variabilité du rendement grain en fonction des traitements sur une période de 32 ans.

1 = NOP0K0; 2 = NOP0K0+MO; 3 = N60P10K12; 4 = N97P20K48; 5 = N111P30K60; 6 = N80P30K40; 7 = N90P30K40; 8 = N100P30K40; 9 = N110P30K40; 10 = N120 P30K40.

Tableau XII : Analyse financière des différentes formules d'engrais sur 32 ans

| Traitement | E(x) | E(x) - F(x) | Efficient |
|------------|--------|-------------|-----------|
| NOP0K0 | 179915 | 144858 | Non |
| NOP0K0+MO | 51337 | 14951 | Non |
| N60P10K12 | 197977 | 133922 | Non |
| N97P20K48 | 189989 | 111565 | Non |
| N111P30K60 | 258605 | 163862 | Non |
| N80P30K40 | 316299 | 223708 | Oui |
| N90P30K40 | 305140 | 211883 | Non |
| N100P30K40 | 294498 | 200134 | Non |
| N110P30K40 | 284788 | 190121 | Non |
| N120P30K40 | 275317 | 180257 | Non |

$E(x)$ = Revenu monétaire moyen calculé par le modèle DSSAT

$F(x)$ = Coefficient de Gini

4.3. Synthèse

Les résultats obtenus de la simulation par le modèle DSSAT montrent que les rendements sont fonction des traitements (doses d'engrais). Cependant la comparaison des données simulées à celles observées montrent que la simulation a surestimé le rendement grain et a sous-estimé la biomasse produite et la biomasse totale par rapport aux résultats mesurés. Tous les coefficients de corrélation sont supérieurs à 80%; le modèle a bien simulé les données. De l'analyse saisonnière, le traitement T6 de formule N80P30K40 semble le plus stable du point de vue variabilité climatique et revenu monétaire. Avec une quantité d'azote inférieure aux traitements T4, T5, T7, T8, T9, T10, le T6 fournit un rendement simulé proche des autres traitements. Il ressort que le T6 serait l'option optimale pour ce type de sol.

CONCLUSION

La production du maïs occupe une place importante au Burkina Faso. Cependant la faible fertilité des sols constitue une contrainte majeure à sa production. Les formules d'engrais, autrefois vulgarisées ne permettent plus d'atteindre des rendements élevés dans un contexte de changement climatique. Ainsi il s'avère nécessaire de développer de nouvelles options de fertilisation tenant compte de la variabilité pédoclimatique. Une étude a été conduite en station avec pour objectif d'évaluer la performance du modèle CERES-Maize de DSSAT (Decision Support System for Agro technologique Transfer) sur les différents traitements.

Les résultats montrent que les composantes de rendement ont été affectées par les différents taux d'engrais. Les traitements T9 (N110P30K40) et T10 (N120P30K40) ont eu les rendements les plus élevés. Ces traitements ne diffèrent pas significativement des traitements T4, T5, T6, T7, et T8 mais diffèrent significativement des traitements T1, T2 et T3 du point de vue de l'analyse statistique.

De l'évaluation du modèle CERES-Maize de DSSAT, il ressort que la prédiction des rendements se traduise par des sous-estimations pour la biomasse totale et la biomasse produite et une surestimation pour le rendement grain.

Les coefficients de corrélation R^2 obtenus pour chacun des paramètres sont supérieurs à 0,80, le NRMSE est de 16% pour la biomasse produite, de 10% pour la biomasse totale et 23% pour le rendement grain.

Les prédictions du modèle ont été généralement bonnes. Par conséquent, le modèle est un bon outil d'aide à la prise de décision. Il peut être utilisé comme un outil de développement des recommandations engrais spécifique au site pour améliorer la production de maïs et d'autres cultures dans le pays.

L'application du modèle à l'évaluation pluriannuelle des traitements a permis de représenter quantitativement le risque agroclimatique sur la culture. En simulant différentes périodes sur 32 ans, le traitement T6 semble le plus stable. Ce traitement avec moins d'azote (N80P30K40) que les traitements T4 (N97P20K48), T5 (N111P30K60), T7 (N90P30K40), T8 (N100P30K40), T9 (N110P30K40) et T10 (N120P30K40) et plus d'azote que la dose vulgarisée T3 (N60P10K12) présente moins de risque en termes de variabilités climatiques pour le producteur. Ce traitement permet également d'avoir des revenus monétaires importants et une meilleure efficience des engrais pour la production de maïs à long terme dans la zone d'étude.

Dans le souci d'une agriculture durable, 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 :

- Combiner l'analyse saisonnière pour plusieurs types de sols pour dégager une moyenne ;
- Adapter le traitement T6 et le combiner avec de la fumure organique pour évaluer sa réponse, le valider avant la vulgarisation ;
- Evaluer la performance du modèle sur les traitements pour les périodes futures pour tester leur comportement ;
- L'exploitation des présents résultats pourra être poussée à leur extrapolation aux autres zones de la zone sud-ouest du Burkina. Toutefois, des études de validation du modèle dans d'autres conditions de la région sont requises pour éviter de rendre les sorties du modèle spécifiques du seul site d'essai. Pour cela, des sols de références doivent également être inclus afin de refléter l'hétérogénéité de la réponse NPK sur la production du maïs.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ADDEN K.A., 2005.** Estimation des besoins en Azote, Phosphore et Potassium du Basilic (*Ocimum basilicum* L.) par le Module DSSB et gestion optimale de l'Azote dans la région Maritime du Togo. Mémoire d'ingénieur agronome, IFDC Afrique/ESA –UL, Lomé, Togo, 65 p.
- BACYE B., & BORO A., 2011.** Study of Organic Matter Flows on Farms in the Western Cotton Zone of Burkina Faso. *TROPICULTURA*, 29, (3):148-152.
- BADO B.V., SEDOGO P.M., HIEN V. & LOMPO F., 1991.** Utilisation efficace des engrains azotés pour une augmentation de la production vivrière: l'expérience du Burkina. In: A.U.MOKUWNYE (Ed.) Alleviating Soil Fertility Constraints to Increased Crop Production in West Africa, Kluwer Academie Publishers, Netherlands, pp 115-123.
- BATIONO A., LOMPO F. & KOALA S., 1998.** Research on nutrients flows and balances in West Africa. Agriculture, Ecosystems and Environment 71: 19-35.
- CIMMYT, 1991.** Réalités et tendances: potentiel maïsicole de l'Afrique Subsaharienne, Mexico, Mexique, 71 p.
- CIMMYT, 2000.** World Maize Facts and Trends. Meeting World Maize Needs: Technological opportunities and priorities for the public sector. Mexico, D.F: 60 p.
- CRPA, 1994.** Opération Riz Comoé. Rapport de synthèse. DRA de la Comoé, 70 p.
- DIALLO L., 2002.** Effet de l'engrais azoté et du fumier sur le rendement du maïs. Mémoire de fin d'études, Option : Agronomie, IDR/UPB, Bobo Dioulasso, Burkina Faso, 55 p.
- DOZTSI A.K., 2002.** Application du modèle CERES-Maize de DSSAT à l'analyse des stratégies de semis pour le maïs (*Zea mays* L.) dans les conditions de SEVE KPOTA. Mémoire d'ingénieur agronome, IFDC Afrique/ESA –UL, Lomé, Togo, 91 p.
- DRABO M., 2011.** Effet des apports répétés de diverses sources d'amendements organiques sur quelques propriétés chimiques du sol, la nutrition hydrique et sur les rendements du sorgho dans le plateau central du Burkina Faso (Saria). Mémoire de fin d'études, Option: Agronomie, IDR/UPB, Bobo Dioulasso, Burkina Faso, 50 p.
- Du TOIT A.S., BOOYSEN J. & HUMAN H.H., 2001.** Use of Linear regression and a correlation matrix to evaluate CERES 3 (Maize). In: White, J.W., and P.R. Grace (eds), Modeling extremes of wheat and maize crop performance in the tropics, Proceedings of a workshop. CIMMYT, El Batán (Mexico), 19-22 April 1999, Mexico, D.F. CIMMYT.
- EDZANG O. V., 2000.** Effet de la date d'application de l'azote sur les composantes du

rendement et les rendements des variétés de maïs à cycle intermédiaire, précoce et extra-précoce. Mémoire de fin d'études, Option: Agronomie, IDR/UPB, Bobo Dioulasso, Burkina Faso, 46 p.

FALISSE A. & LAMBERT J., 1994. Fertilisation minérale et organique. In : TAYEB

AMEZIANI: E.H.: PERSOOONS E. Agronomie moderne : Bases physiologiques et agronomiques de la production végétale. Hatier-AUPELF-UREP, pp 377-398.

FAO, 2001. Water and soil requirement of crops. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy, Online at:

<http://www.fao.org/docrep/U3160E/u3160e04.htm>. Consulté le 30/12/2011.

FAO, 2002. Le maïs en zones tropicales. Amélioration et production, FAO, Rome, 382 p.

FAO, 2003. Gestion de la fertilité des sols pour la sécurité alimentaire en Afrique Subsaharienne, 10 p.

FAO, 2011. Online at: <http://www.fao.org>. Consulté le 30/12/2011.

FONTES J. & GUINKO S., 1995. Carte de la végétation et de l'occupation du sol du Burkina Faso: notice explicative. Ministère de la coopération Française, 53 p.

GAY J. P., 1984: Fabuleux maïs: histoire et avenir d'une plante, AGPM, Info compo, Pau. 295 p.

GOMEZ K.A. and GOMEZ A.A., 1984. Statistical procedures for agricultural research, 2nd Ed. IRRI. New York: John Wiley and Sons, Inc. 680 p.

GUY R., 1984. Le maïs, le technicien de l'agriculture tropicale, 142 p.

HOOGENBOOM, G., JONES J.W., WILKENS P.W., PORTER C.H., BOOTE K.J., HUNT L.A., SINGH U., LIZASO J.L., WHITE J.W., URYASEV O., ROYCE F.S., OGOSHI R., GIJSMAN A.J. & TSUJI G.Y., 2010. Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT) Version 4.5 [CD-ROM]. University of Hawaii, Honolulu, Hawaii.

HOOGENBOOM G., WILKENS P.W & TSUJI G.Y (eds.) 1999. DSSAT v3, University Of Hawaii, Honolulu, Hawaii.

IDDI, A. O., 1987. Contribution à l'étude d'une technique de criblage pour la résistance du maïs (*Zea mays L.*) à l'*Helminthosporium maydis*. Mémoire de fin d'étude. Université de Ouagadougou, Burkina Faso, 110 p.

IITA, 2001. Maize International Institute of Tropical Agriculture. Online at:

<http://www.iita.org/crop/maize.htm>. Consulté le 30/12/2011.

JAMIESON P. D., PORTER J. R. & WILSON D. R., 1991. A test of the computer simulation model ARC-WHEAT1 on wheat crops grown in New Zealand. Field Crops

Research 27: 337–350.

- JONES J.W., HOOGENBOOM G., PORTER C.H., BOOTE K.J., BATCHELOR W.D., HUNT L.A., WILKENS P.W., SINGH U., GIJSMAN A.J. & RITCHIE J.T., 2003.** The DSSAT cropping system model. *European Journal of Agronomy*, 18: 235–265.
- KABRAH Y., YAO N. R., DEA G. B. & COULOUD1. Y., 1996.** Effet de l'apport d'engrais et de matière organique sur le rendement en grains chez le maïs. *Cahiers Agricultures* 5: 189-93.
- KAMBIRE H., ABDEL-RAHMAN G., BACYE B. & DEMBELE Y., 2010.** Modeling of Maize Yields in the South-Sudanian Zone of Burkina Faso - West Africa. *American-Eurasian J. Agric. & Environ. Sci.*, 7 (2): 195-201.
- KAMBIRE S.H., 1989.** Effets d'un amendement calcique sur les caractéristiques physico-chimiques d'un sol ferrugineux tropical peu lessivé soumis au labour et à la culture continue d'arachide. Mémoire, Diplôme d'Etudes Approfondies (D.E.A) en Science de l'environnement, Université Cheikh Anta Diop de Dakar, institut des Sciences de l'environnement, 67 p.
- KOBAYASHI K. & US SALAM M., 2000.** Comparing simulated and measured values using mean squared deviation and its components. *Agronomy Journal* 92: 345 – 352.
- LAMBERT J., TREMBLAY N. & HAMEL CH., 1994.** Nutrition minérale des plantes cultivées. In : TAYEB AMEZIANE E.H.; PERSOONS E.; Biologie moderne: Bases physiologiques et agronomiques de la production végétale. Hatier-AUPELF-UREF, pp 269-292.
- LOAGUE K. & GREEN R. E., 1991.** Statistical and graphical methods for evaluating solute transport models: overview and application. *Journal of Contaminant Hydrology* 7: 51–73.
- MAHRH, 2001.** Plan d'action sur les céréales (Mil, Sorgho, Maïs), 13 p.
- MARTIN P., 2009.** L'analyse de programmes au sein des plateformes logicielles : syntaxe, sémantique et pragmatiques. Application aux plateformes dédiées aux simulations en agronomie. Thèse présentée en vue de l'obtention du grade de Docteur de l'université de Montpellier II, France, 138 p.
- MATTHEWS R., STEPHENS W., HESS T., MASSON T. & GRAVES. 2000.** Application of crop/soil simulation models in developing countries. Final Report. Institute of Water and Environment, Cranfield University, Silsoe, Bedfordshire MK45 4DT, United Kingdom, 173 p.

- NURUDEEN A. R., 2011.** Decision support system for agro-technology transfer (DSSAT) model simulation of maize growth and yield response to NPK fertilizer application on a benchmark soil of Sudan savanna agro-ecological zone of Ghana. Master of Science thesis. Department of Crop and Soil Sciences, Faculty of Agriculture, Kwame Nkrumah University of Science and Technology Kumasi, Ghana, 120 p.
- OUFI M., 2005.** Simulation du modèle DSSAT sur le Blé. Mémoire de troisième cycle Agronomie, IAV Hassan II, Rabat, Maroc, 120 p.
- PIERI C., 1989.** Fertilité des terres de savane. Bilan de trente ans de recherche et de développement agricoles au sud du Sahara. Agridoc-International, Paris, France, 444 p.
- RABAT., 2003.** Les engrais et leurs applications. Quatrième édition. 77 p.
- ROUANET G., 1984:** Le maïs : Le technicien d'Agriculture tropicale. Édition Maisonneuve et Larose, Paris, France, 142 p.
- SANOU J., 1996 :** Analyse de la variabilité génétique des cultivars locaux de maïs de la zone de savane Ouest Africaine en vue de sa gestion et de son utilisation. Thèse de doctorat, ENSA. Montpellier, France, 98 p.
- SANOU J., 2003.** Production du maïs au Burkina Faso. Effort de recherche pour le Maïs riche en protéine. INERA, Bobo-Dioulasso, Burkina Faso, 5 p.
- SEDOGO P.M., 1993.** Evolution des sols ferrugineux lessivés sous culture/ incidence des modes de gestion sur la fertilité. Thèse de doctorat. Université de Cocody, Côte d'Ivoire, 285 p.
- SERE Y., 1990.** La striure et les autres maladies du maïs au Burkina Faso. In Lutte intégrée contre les ennemis des cultures vivrières dans le Sahel. Proceedings du séminaire international de lutte intégrée, 4-9 Janvier 1990. Institut du Sahel, Bamako, Mali, pp 276-284.
- TRAORE N.S., 1997.** Etude bioécologique des Cicadelles du genre *Cicadulina* (*Homoptera Cicadellidae*), vectrices de la striure du maïs au Burkina Faso. Implication épidémiologique. Thèse de doctorat d'Etat, Université de Cocody, Abidjan, Côte d'Ivoire, 248 p.
- TRAORE O., 1993.** Épidémiologie de la striure du Maïs en zone soudano-sahélienne : cas du Burkina Faso. Thèse de Doctorat, université de Ouagadougou, Burkina Faso, 116 p.
- TRAORE S., LECLANT F., OUEDRAOGO I. & DABIRET R., 1996.** Inventaire, distribution géographique et capacité intrinsèque de *Cicadulina* spp. (*Homoptera*:

Auchenorrhynques : Cicadellidae) à transmettre le virus de la striure du maïs au Burkina Faso. Ann. Univ.de Ouagadougou, Series B, vol IV, 24 p.

WALLACH D. & GOFFINET B., 1987. Mean squared error of prediction in models for studying ecological and agronomic systems. *Biometrics* 43: 561–573.

WILMOTT C. J., ACKLESON S. G., DAVIS R. E., FEDDEMA J. J., LEGATES K. M., LEGATES D. R., O'CONNELL J. & ROWE C. M., 1985. Statistics for the evaluation and comparison of models. *Journal of Geophysical Research* 90 (C5): 8995–9005.

YARO D.T., IWUAFOR E. N. O., CHUDE V. O. & TARFA B. D., 1997. Use of organique manure and inorganique fertilizer in maize production: A field evaluation. In strategy for sustainable maize production in west and central Africa, pp 237-239.

ANNEXES

Annexe 1: Éléments nutritifs par traitement

| Traitements | Options à valider |
|-------------|---|
| 1 | Témoin absolu |
| 2 | Témoin + 2,5tonnes de fumier à l'hectare |
| 3 | Recommandation traditionnelle (100NPK+100urée) |
| 4 | Recommandation semi-intensive (200NPK+150urée+50KCl) |
| 5 | Recommandation intensive (300NPK+150urée+50KCl) |
| 6 | 174 kg ha ⁻¹ Urée + 149 kg ha ⁻¹ TSP + 80 kg ha ⁻¹ KCl |
| 7 | 196 kg ha ⁻¹ Urée + 149 k ha ⁻¹ TSP + 80 kg ha ⁻¹ KCl |
| 8 | 217 kg ha ⁻¹ Urée + 149 kg ha ⁻¹ TSP + 80 kg ha ⁻¹ KCl |
| 9 | 239 kg ha ⁻¹ Urée + 149 kg ha ⁻¹ TSP + 80 kg ha ⁻¹ KCl |
| 10 | 261 kg ha ⁻¹ Urée + 149 kg ha ⁻¹ TSP + 80 kg ha ⁻¹ KCl |

Annexe 2: Présentation de DSSAT

Le projet DSSAT (Decision Support System for Agro technologique Transfert) a été conçu vers les années 1988 par l'IBSNAT (International Benchmark Sites Network for Agrotechnology Transfer) en vue d'améliorer les processus de prise de décision en agriculture (JONES et al., 2003). Le développement de DSSAT est aujourd'hui pris en charge par le consortium ICASA (International Consortium for Agricultural Systems Applications; <http://www.icasa.net>) (MARTIN, 2009). L'ICASA est née en 1994 en tant que société non bénéficiaire chargée d'assurer la continuité du développement des outils des systèmes y compris DSSAT (OUFI, 2005). Selon (HOOGENBOOM et al., 1999), DSSAT est un logiciel de micro-ordinateur. La figure donne les modèles agricoles incorporés dans le système DSSAT.

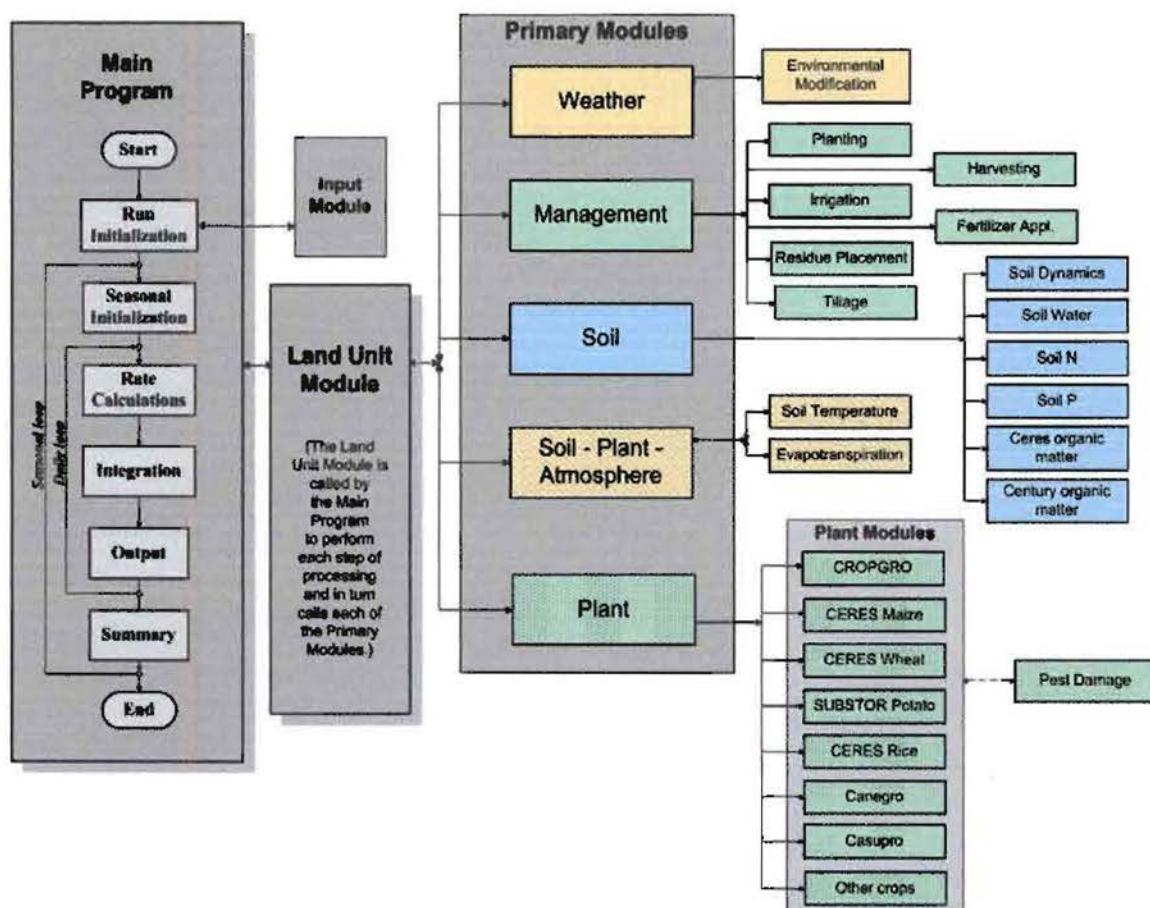


Figure: Le coquille du système DSSAT montrant les principaux modules (source: JONES et al., 2003).

Annexe 3: profil du sol

| Date | 05 mai 1997 | | |
|---|---|-----------------|------------------|
| Numéro de profil | BD97 | | |
| Couleur | Brun – jaune | | |
| Nom CPCS | SOL FERRUGINEUX LESSIVE INDURE PROFOND (FLIP) | | |
| Profondeur exploitable | 80 cm | | |
| Auteur | BUNASOLS (2006) | | |
| Localisation | 10°30'16" N; 3°59'25" O | | |
| Pente % | 1 | | |
| Types d'analyse | Intitulé | horizon 0-24 cm | horizon 24-50 cm |
| Analyse granulométrique | Sable (%) | 9,8 | 15,69 |
| | Limon (%) | 23,53 | 19,60 |
| | Argile (%) | 66,67 | 64,71 |
| | Texture | LS | LS |
| Constantes hydriques | pF 2,5 (%) | 15,42 | 17,2 |
| | pF 3 (%) | 5,10 | 6,17 |
| | pF 4,2 (%) | 3,29 | 4,32 |
| | pF 2,5 – pF 4,2 | 12,1 | 12,9 |
| Matière organique | Matière organique total (%) | 1,7 | 1,42 |
| | Carbone total (%) | 0,99 | 0,82 |
| | Azote (%) | 0,06 | 0,03 |
| | C/N | 16 | 27 |
| Potassium | Potassium total (ppm K) | 842 | 842 |
| | Potassium disponible (ppm) | 42 | 35 |
| Phosphore | Phosphore total (ppm P) | 331 | 177 |
| | Phosphore assimilable (ppm P) | 20,04 | 2,82 |
| Bases échangeables Méq / 100 g de terre fine | Calcium Ca ⁺⁺ | 2,61 | 2,40 |
| | Magnésium Mg ⁺⁺ | 0,59 | 0,91 |
| | Potassium k ⁺ | 0,07 | 0,12 |
| | Sodium Na ⁺⁺ | <0,01 | 0,04 |
| | Somme des bases (S) | 3,27 | 3,47 |
| | Capacité d'échange (T) | 7,31 | 7,54 |
| | Taux de saturation (S / T) | 45 | 46 |
| Réaction | pH eau | 6,49 | 6,30 |
| | pH KCl | 5,04 | 4,60 |

Source : BUNASOLS (2006)

Annexe 4: calendrier cultural de l'essai maïs à INERA/BANFORA en 2011

| Dates | Activités |
|-------------------|--|
| 07 Juillet 2011 | Labour |
| 09 Juillet 2011 | Pulvérisage |
| 11 Juillet 2011 | Prélèvement des échantillons de sol et de fumure organique |
| 12 Juillet 2011 | Piquetage |
| 13 Juillet 2011 | Epandage fumure organique |
| 17 Juillet 2011 | Semis |
| 01 Août 2011 | 1 ^{er} sarclage |
| 07 Août 2011 | Epandage engrais minéraux |
| 07 Août 2011 | Epandage 1 ^{ere} fraction d'urée |
| 26 Août 2011 | Deuxième sarclage |
| 02 Septembre 2011 | Epandage deuxième fraction d'urée |
| 02 Septembre 2011 | Buttage |
| 01 Novembre 2011 | Relever du nombre de plantes/parcelle utile |
| 03 Novembre 2011 | Récolte |
| 13 Novembre 2011 | Récolte de la paille |
| 14 Novembre 2011 | Poids paille par parcelle utile |
| 15 Novembre 2011 | Poids épi par parcelle utile |
| 24 Novembre 2011 | Poids grains |
| 28 Décembre 2011 | Poids de 1000 grains |

Annexe 5: Effet des traitements sur le maïs



T10



T9



T8



T7



T6



T5



T4



T3



T2



T1

Photos BAMBARA, Septembre 2011