TABLE DES MATIERES

DEDICACE i

AVANT-PROPOS ii

REMERCIEMENTS iii

LISTES DES FIGURES iv

LISTES DES TABLEAUX v

SIGLES ET ABREVIATIONS vi

RESUME vii

ABSTRACT viii

INTRODUCTION GENERALE 1

CHAPITRE 1: SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE 4

I. Généralités sur le maïs (*Zea mays* L.) 4

1.1. Cycle, physiologie et reproduction du maïs 4

1.2. Importance de la culture du maïs au Burkina Faso 5

1.3. Contraintes liées à la culture du maïs 6

II. Gestion Intégrée de la fertilité du sol 8

2.1. Définition de la fertilité du sol 8

2.2. La fertilisation du maïs 9

2.3. Contraintes à la gestion de la fertilité des sols 9

2.4. Pratiques de gestion intégrée de la fertilité des sols 10

III. Approche de modélisation : le modèle DSSAT 12

3.1. Les systèmes d'aide à la décision en agriculture 12

3.2. La modélisation et l'importance des modèles agricoles dans l'agriculture 12

3.3. Présentation du modèle DSSAT 14

CHAPITRE 2 : MATERIELS ET METHODES 18

I. Cadre de l'étude 18

1.1. Situation géographique 18

1.2. Climat 19

1.3. Géologie et Géomorphologie 21

1.4. Sols 21

1.5. Hydrographie 22

1.6. Végétation 22

1.7. Population 22

1.8. Principales activités 22

II. Matériels 23

2.1. Matériel végétal 23

2.2. Fertilisants 23

2.3. Sol 24

III. Méthodes 24

3.1. Dispositif expérimental 24

3.2. Conduite de l'expérimentation 27

3.3. Paramètres mesurés 27

3.3.2. Paramètres de fertilité des sols 28

3.3.2.1. Méthodes d'échantillonnage du sol et des substrats utilisés dans la fertilisation 28

3.3.2.2. Analyses chimiques 28

3.4. Analyses statistiques 30

3.5. Méthodologie d'application du modèle DSSAT 30

CHAPITRE 3 : RESULTATS ET DISCUSSIONS 36

I. Effets des facteurs étudiés sur les rendements du maïs 36

1.1. Résultats 36

1.2. Discussion 38

II. Effet combiné des facteurs étudiés sur les rendements du maïs 39

2.1. Résultats 39

2.2. Discussion 46

III. Evaluation de la performance du modèle DSSAT sur la simulation de la croissance et du développement du maïs 48

3.1. Résultats....48

3.2. Application du modèle DSSAT à l'évaluation pluriannuelle du rendement grain de maïs 54

3.3. Discussion....56

3.4. Discussion générale....57

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES....59

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES....61

ANNEXES....71

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

LISTES DES FIGURES

Figure 1 : Cycle du maïs. 4

Figure 2 : Coquille du système DSSAT montrant les principaux modules. 16

Figure 3 : Carte de localisation du site d'étude. 18

Figure 4 : Quantité et nombre de jours des dix dernières années à Kouaré....20

Figure 5: Pluviosité de la campagne 2012 à Kouaré....20

Figure 6 : Dispositif expérimental de l'essai 26

Figure 7 : Comparaison des rendements grains dus aux trois facteurs combinés 43

Figure 8 : Comparaison des rendements paille dus aux trois facteurs combinés....43

Figure 9: Représentation dispersée du rendement grain simulé en fonction du rendement grain observé. 50

Figure 10 : Représentation dispersée du rendement paille simulée en fonction du rendement paille observée. 52

Figure 11: Représentation dispersée de la biomasse totale simulée en fonction de la biomasse totale observée. 54

Figure 12: Représentation de la variabilité du rendement grain en fonction des traitements sur une période de 36 ans. 55

Rapport-Gratuit.com

LISTES DES TABLEAUX

Tableau I : Effet du stress hydrique sur l'élaboration du rendement du maïs 7

Tableau II : Caractéristiques physico-chimiques du sol avant l'implantation de l'essai 21

Tableau III : Caractéristiques de la variété du maïs Barka.....23

Tableau IV : Caractéristiques chimiques du fumier.....24

Tableau V : Caractéristiques physico-chimiques d'un profil du sol du site d'étude.....24

Tableau VI : Prix de vente et coûts de production de maïs dans la zone d'étude.....35

Tableau VII : Effet de la densité de semis sur le poids de 1000 grains et les rendements du maïs 36

Tableau VIII : Effet de la matière organique sur le poids de 1000 grains et les rendements du maïs ...37

Tableau IX : Effets des formules d'engrais sur le poids de 1000 grains et les rendements du maïs 38

Tableau X : Effet combiné de la densité de semis et de la matière organique sur le poids de 1000 grains et les rendements du maïs 40

Tableau XI : Effet combiné de la densité de semis à la formule d'engrais sur le poids de 1000 grains et les rendements grains et pailles du maïs 41

Tableau XII : Effet combiné de la matière organique à la formule d'engrais sur le poids de 1000 grains et les rendements grains et paille du maïs 42

Tableau XIII : Effet combiné des trois facteurs étudiés sur le poids de 1000 grains du maïs 44

Tableau XIV : Synthèse de l'ANOVA des effets des principaux facteurs sur le poids de 1000 grains et les rendements du maïs 45

Tableau XV : Coefficients génétiques calculés pour la variété Barka à l'aide du programme GLUE...48

Tableau XVI : Comparaison entre les valeurs mesurées et simulées du rendement grain 49

Tableau XVII : Comparaison entre les valeurs mesurées et simulées du rendement paille 51

Tableau XVIII : Comparaison entre les valeurs mesurées et simulées de la biomasse totale 53

Tableau XIX : Analyse financière des différents traitements sur 36 ans 56

SIGLES ET ABREVIATIONS

AGRA : Alliance for a Green Revolution in Africa

ANOVA : Analyse de Variance

BUNASOLS : Bureau National des Sols

C.I.R.A.D : Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement

C.N.R.S.T : Centre National de la Recherche Scientifique et Technologique

CTA : Centre Technique de coopération Agricole et rurale

DRREA-Est : Direction Régionale de Recherches Environnementales et Agricoles de l'Est

DGPER : Direction Générale de la Promotion de l'Economie Rurale

DSSAT: Decision Support System for Agrotechnology Transfer

FAO : Food and Agricultural Organisation

GNIS : Groupement National Interprofessionnel des Semences et plants

GRET : Groupe de Recherche et d'Echanges Technologiques

INSD : Institut National de la Statistique et de la Démographie

IDR: Institut du Développement Rural

IFDC: International Center for Soil Fertility and Agricultural Development

INERA : Institut de l'Environnement et de Recherches Agricoles

IBSNAT: International Benchmark Sites Network for Agrotechnology Transfer

INRAN: Institut National de Recherche Agronomique du Niger

I.N.R.A : Institut National de Recherche Agronomique

JAS : Jours après semis

MAE : Ministère des Affaires Etrangères

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

MFAA : Ministère Français de l'Agriculture et l'Agroalimentaire

NRMSE: Erreur moyenne normalisée de prédiction

O.R.S.T.O.M : Institut Français de Recherche scientifique pour le Développement en Coopération

PCD : Plan communal de Développement

PNTTA : Programme National de Transfert de Technologie en Agriculture

RECA : Réseau National des Chambres d'Agriculture du Niger

RGPH : Recensement Général de la Population et de l'Habitation

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

UPB : Université Polytechnique de Bobo-Dioulasso

RESUME

Dans le but de déterminer l'option de fertilisation organo-minérale et de la densité de semis optimale pour une amélioration de la production du maïs dans la région de l'Est du Burkina Faso, une expérimentation a été conduite à la station expérimentale de l'INERA Kouaré. Un dispositif en split-split plot randomisé avec quatre répétitions a été installé sur un sol ferrugineux tropical lessivé à texture limono-sableuse. Deux niveaux de fertilisation organique (Avec et Sans matière organique), trois niveaux de densité de semis (D1: 80 cm*40 cm ; D2:70 cm*40 cm et D3: 60 cm*40 cm) ainsi que quatre niveaux de fertilisation minérale (F1: Témoin ; F2: 75,5N-20P ; F3: 74N-20P-23K et F4: 96N-30P) ont été appliqués. Les résultats ont montré que la formule d'engrais 74N-20P-23K en présence de matière organique a induit un meilleur poids moyen de 1000 grains de 183 g et un meilleur rendement grain de 3075 kg/ha. Cependant, le meilleur rendement paille est obtenu avec la formule d'engrais 96N-30P en présence de matière organique. Il ressort aussi que la fertilisation organique combinée avec la formule 74N-20P-23K aux écartements 60 cm*40 cm et 80 cm*40 cm ont entrainé les meilleurs poids moyens de 1000 grains de 183 g. Cette fertilisation organo-minérale aux écartements 70 cm*40 cm a donné le meilleur rendement moyen grain de 3274 kg/ha alors que le meilleur rendement paille est observé avec la formule d'engrais 75,5N-20P en présence de matière organique à la densité de semis 80 cm*40 cm. Le modèle DSSAT a bien effectué les simulations et a été performant pour le rendement grain, le rendement paille et la biomasse totale avec des corrélations R^2 respectives de 74 %, 72 % et 81 %. L'analyse saisonnière par le modèle a confirmé que la fertilisation organique combinée avec la formule 74N-20P-23K aux écartements 70 cm*40 cm présente moins de risque du point de vue variabilité climatique pour une meilleure production du maïs. En perspective, la validation de la recommandation de ce traitement doit être faite après sa confirmation en milieu paysan.

Mots clés : Maïs, fertilisation organo-minérale, Densité de semis, DSSAT, Burkina Faso.

ABSTRACT

In the aim to determine the organo-mineral fertilization option and optimal sowing density to improve maize production in the eastern region of Burkina Faso, an experiment was carried out at the experimental station of INERA Kouaré. A split-split plot randomized design with four replications was installed on a tropical leached ferruginous soil with a sandy loam texture. Two levels of organic fertilization (With and Without organic matter), three levels of sowing density (D1: 80 cm * 40 cm, D2: 70 cm * 40 cm and D3: 60 cm * 40 cm) and four levels of mineral fertilization (F1: control, F2: 75. 5 N-20P, F3: 74N-20P-23K and F4: 96N-30P) were applied. The results showed that the fertilizer 74N-20P-23K in the presence of organic matter leads to a better average 1000 grains weight of 183 g and a better grain yield of 3075 kg / ha. However, the best straw yield is obtained with the fertilizer 96N-30P in the presence of organic matter. It also appears that organic fertilization combined with the formula 74N-20P-23K with the spacing 60 cm * 40 cm and 80 cm* 40 cm have led to the best 1000 grains weight of 183 g. Organo-mineral fertilization with the spacing 70 cm * 40 cm gave the best grain yield of 3274 kg / ha while the best straw yield was observed with the fertilizer 75.5N-20P in the presence of organic matter at the sowing density 80 cm * 40 cm. DSSAT model has performed the simulations and was effective for grain yield, straw yield and total biomass with respective R^2 correlations of 74%, 72% and 81%. The seasonal analysis of the model confirmed that organic fertilizer formula combined with 74N-20P-23K with spacing 70 cm * 40 cm is less risky in terms of climate variability for a better maize production. In perspective, the validation of the recommendation of this treatment should be made after confirmation in rural areas.

Key words: maize, organo-mineral fertilization, sowing density, DSSAT, Burkina Faso.

INTRODUCTION GENERALE

Le déclin de la fertilité des sols est l'une des principales causes de la chute des rendements des cultures en Afrique Sub-saharienne (Youl *et al.*, 2011). Cette baisse de fertilité est attribuée aux contraintes climatiques et anthropiques qui se traduisent par la dégradation des sols dans un contexte de pression démographique galopante.

En effet, la perte des éléments nutritifs du sol est le facteur qui contribue le plus au processus de dégradation des sols. Selon le Centre international pour la fertilité des sols et le développement agricole (IFDC), l'Afrique perd chaque année 8 millions de tonnes métriques d'éléments nutritifs du sol et plus de 95 millions d'hectares de terre ont été dégradés au point de réduire de manière significative la productivité (Henao et Baanante, 2006). D'après les estimations, au moins 85 % des pays africains souffrent d'un prélèvement des nutriments de plus de 30 kg par hectare et par an et 40 % des pays subissent des pertes de plus de 60 kg de nutriments par hectare et par an (Banque mondiale, 2006 ; Henao et Baanante, 2006).

Cette perte est due entre autres à l'érosion hydrique, à la dégradation chimique et physique du sol, mais aussi en grande partie à l'agriculture minière (Dudal, 2002). Dans un tel contexte, l'intensification agricole se présente comme la seule voie à même d'améliorer les conditions de vie des populations et d'assurer l'autosuffisance alimentaire (Ouédraogo, 2011).

Ainsi, il est devenu urgent de développer des techniques de fertilisation accessibles aux producteurs et permettant d'augmenter la production par unité de surface tout en maintenant la fertilité des sols à long terme (Bado, 2002).

L'utilisation des engrais minéraux joue un rôle important dans la stratégie de lutte contre la dégradation des sols, et pour la restauration de la fertilité des sols et une meilleure gestion des ressources du sol indispensables à un développement agricole et économique durable (Henao et Baanante, 1999). Elle s'avère être l'une des clés de l'intensification agricole en Afrique Sub-saharienne. Cependant, les niveaux d'engrais minéraux utilisés sont très bas (en moyenne moins de 10 $kgha^{-1}$). De plus, les mêmes recommandations sont souvent préconisées sur différentes cultures quel que soit le type de sol ou la zone climatique, alors que la fertilité originelle des sols diffère beaucoup à l'intérieur d'une région (Henao et Baanante, 2006).

Ces recommandations pour le maïs sont pan-territoriales, la même combinaison d'engrais quelles que soient les zones agro-écologiques. De plus, la plupart de ces formules sont

devenues désuètes rendant souvent inefficiente l'utilisation des engrais, et incapables de s'adapter aux variations climatiques. Il en est de même de la prise en compte insuffisante de la diversité des sols existants au Burkina Faso et donc de leur fertilité initiale (Youl *et al.*, 2011).

Ainsi, en fonction de la variabilité climatique et du type de sols spécifiques des différentes régions du Burkina Faso, l'IFDC en collaboration avec l'Institut de l'environnement et de recherches agricoles du Burkina Faso (INERA) ont obtenu quelques résultats intéressants après quelques années de mise en œuvre d'une approche communautaire de détermination de la capacité nutritive des sols. Ces résultats concernent le sorgho dans la zone Nord, le coton à l'Est, le sorgho et le maïs à l'Ouest et au Centre le maïs. Ils ont permis de montrer que l'azote et le phosphore sont les éléments les plus limitant de la production de ces cultures dans ces zones. Des options ont été identifiées comme les plus spécifiques avec ces cultures dans ces différentes zones d'étude.

Dans la plupart des cas, les expériences ne prenaient pas en compte l'étendue de variabilité spatiale et temporelle associée à la production agricole. En outre, les expériences sont souvent très coûteuses et prennent du temps car elles doivent être effectuées sur de nombreuses années, et dans des écologies variées pour permettre de faire des recommandations valables pour une région (Nuredeen, 2011).

Face au coût onéreux et au long temps nécessaire pour la mise à jour de ces recommandations, l'utilisation d'outils d'aide à la décision tels que DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology Transfer) se révèle être une option judicieuse. DSSAT est un modèle dynamique reconnu pour la simulation de la croissance et du développement des cultures puis la formulation des doses optimales d'engrais à partir des données sur le sol, le climat, les caractéristiques des cultures et le prix des intrants et produits.

L'adoption de ces outils permettra de proposer des formules de fertilisation adaptées pour une production intensive des cultures dans les différentes zones du Burkina Faso. C'est dans cette optique que s'inscrit notre présente étude intitulée « Détermination des options de fertilisation organo-minérale et de la densité de semis optimale pour une amélioration de la production du maïs dans la région de l'Est du Burkina Faso».

Les objectifs spécifiques de ce thème se résument comme suit :

- évaluer la réponse de la culture de maïs aux formules spécifiques d'engrais ;

- évaluer la réponse de la culture de maïs à l'effet combiné de la fertilisation et de la densité de semis ;
- valider les recommandations de fertilisation du maïs dans la zone Est du Burkina Faso avec le modèle DSSAT.

Notre approche a été bâtie autour des hypothèses suivantes:

- l'utilisation de la matière organique combinée à une formule spécifique d'engrais accroît les rendements de maïs dans la zone Est du Burkina Faso ;
- une forte densité de semis avec une fertilisation organo-minérale adaptée, augmente la productivité du maïs sur un sol ferrugineux tropical lessivé ;
- le modèle DSSAT permet de déterminer et de valider les recommandations des doses d'engrais appropriées et la densité optimale pour la région de l'Est du Burkina Faso.

La présente étude est subdivisée en trois chapitres dont la synthèse bibliographique constitue le premier chapitre, le deuxième chapitre concerne la méthodologie et enfin le troisième chapitre présente les résultats et la discussion. Enfin, une conclusion termine le document et donne des perspectives de recherche.

CHAPITRE 1: SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

I. Généralités sur le maïs (*Zea mays* L.)

1.1. Cycle, physiologie et reproduction du maïs

Le maïs, *Zea mays* L., est originaire de l'Amérique centrale. C'est une plante herbacée annuelle qui appartient à la classe des monocotylédones, la sous-classe des *commelinidae*, l'ordre des cypérales, la famille des poacées (ou graminées) et la sous-famille des panicoïdées (Gay, 1984 ; Rouanet, 1984).

Le cycle du maïs commence après le semis c'est-à-dire à partir de la germination et se termine par le remplissage et la maturation des grains. Ces étapes sont :

- La germination ;
- La levée ;
- La formation de la tige, des feuilles et des racines ;
- La formation des organes reproducteurs ;
- La floraison et fécondation ;
- Remplissage et maturation des grains.

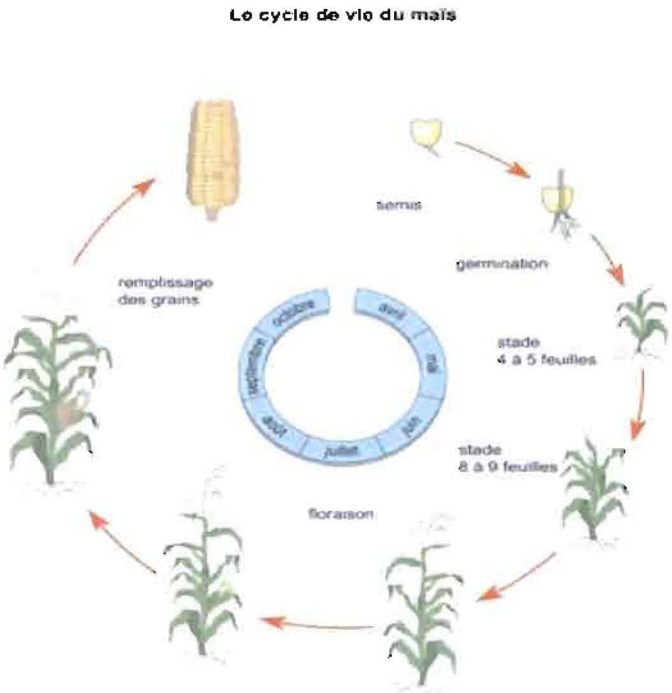

Figure 1 : Cycle du maïs.

Source : www.assistancescolaire.com/.../le-cycle-de-vie-du-mais-remi0315 consulté le 29/09/2012.

Le maïs est une plante monoïque : les fleurs mâles et femelles sont portées par le même pied, mais sont placées à des endroits différents. L'inflorescence femelle (l'épi) se développe latéralement à partir d'un bourgeon axillaire, inséré à l'aisselle d'une feuille située au milieu de la plante. L'épi possède 12 à 20 rangées d'ovules surmontées de longs styles, les soies. Il est protégé par 10 à 20 feuilles modifiées, les spathes. L'inflorescence mâle (la panicule) est constituée d'épillets comportant chacun deux fleurs. Elle est ramifiée et située à l'extrémité de la tige. A chacune des phases de développement de la plante, correspond la formation d'un ou plusieurs organes essentiels.

La phase végétative correspond à la formation de l'ensemble de la tige et des feuilles, et se termine quand les limbes de 5 à 10 feuilles sont visibles. La durée de cette phase dépend de la précocité de la plante et des conditions climatiques.

La phase de reproduction correspond à la formation et au développement des organes reproducteurs. L'épi commence à se développer un mois avant la floraison (stade 7-8 feuilles). Le nombre de rangs de grains portés par l'épi est déjà déterminé à cette date. La panicule se développe dès la fin de la phase végétative. La formation du pollen débute 2 à 3 semaines avant la floraison.

Le mode de reproduction

Généralement, les anthères du maïs sont mûres de 2 à 4 jours avant que les styles (soies) ne deviennent réceptifs : le maïs est dit protandre. Du fait de la monoécie et du décalage dans le temps de la maturité mâle et femelle, la fécondation croisée est favorisée. Le maïs est donc naturellement une espèce allogame. Il est autofertile mais avec une forte dépression de consanguinité. Le maïs maintenu en populations isolées (sans contrôle de la pollinisation) est formé d'individus hétérozygotes mais proches les uns des autres pour un certain nombre de caractères (GNIS, 2007).

1.2. Importance de la culture du maïs au Burkina Faso

Au Burkina Faso, le maïs est la céréale la plus cultivée après le sorgho et le mil (DGPER, 2010). Il est cultivé dans les zones soudaniennes et soudano-sahéliennes où les conditions pluviométriques sont plus favorables (Sarr *et al.*, 2011). La zone de culture du maïs représente trois quarts de la superficie totale du pays. Depuis les années 2000, les superficies emblavées en maïs sont en constante augmentation. Ces superficies, évaluées à 608 368 hectares en 2008 représentaient 14,5% des superficies emblavées en céréales (Sarr *et al.*, 2011).

Les recherches de ces auteurs ont rapporté que le maïs est essentiellement destiné à l'autoconsommation et procure des revenus monétaires variables selon les exploitations. Les

résidus de maïs constituent également une source importante d'aliments pour les animaux. Par conséquent, d'une culture à vocation alimentaire, le maïs est devenu progressivement une culture de rente avec une plus grande réceptivité aux améliorations techniques (Wey, 1998). Cependant, la culture du maïs est une activité agricole sensible aux aléas du climat et des conditions météorologiques ainsi qu'aux contraintes pédologiques et phytopathologiques.

1.3. Contraintes liées à la culture du maïs

1.3.1. Effet de la variabilité climatique

La culture est sensible aux aléas climatiques liés à la variabilité et aux extrêmes pluviométriques. En effet, la variabilité des pluies est souvent conjuguée à des événements climatiques extrêmes (inondations, sécheresses et températures chaudes) qui ont des conséquences désastreuses sur la production agricole et les revenus des populations. En 2007, une des années de pires inondations en Afrique de l'Ouest depuis plus de 30 ans, 17 689 ha de cultures ont été inondées au Burkina Faso. Ceci a occasionné des pertes de production agricole de 13 500 tonnes (Sarr et Lona, 2009).

Il est bien connu qu'un stress causé par les températures élevées, résultera en un taux de développement rapide et par conséquent une période de croissance linéaire courte. Chez le maïs, le remplissage des grains se ralentit. La sénescence se produit alors rapidement entraînant non seulement une production globale de biomasse faible, mais aussi un rendement en grain faible dû à des grains peu lourds (Dzotsi, 2002). La production de biomasse est très sensible aux variations de rayonnement intercepté et la vitesse de développement du maïs est étroitement déterminée par les conditions de températures (Wey, 1998).

Le maïs est une culture qui présente une grande sensibilité à la fois au déficit hydrique et à l'excès d'eau (Sarr *et al.*, 2011). Les périodes critiques de déficit hydrique pour le maïs sont la floraison et la formation de grains (Deumier *et al.*, 1990). Les études de ces auteurs ont rapporté l'effet du stress hydrique sur les différentes phases du cycle du maïs (**Tableau I**).

Tableau I : Conséquence du stress hydrique sur l'élaboration du rendement du maïs

Phase	Effet du stress hydrique
Végétative	- Ralentissement de la croissance de la surface foliaire - Incidence sur la croissance racinaire
Montaison	- Diminution de la croissance racinaire et foliaire - Réduction de l'activité photosynthétique de la croissance de la tige et du stockage d'assimilant - Incidence possible sur le nombre d'ovules fécondés
Floraison et fécondation	- Abaissement du nombre de grains (avortement, absence d'épis, etc.)
Latence	- Ralentissement de la photosynthèse - Réduction du stockage d'assimilant dans la tige, les grains et les racines - Diminution du nombre de grains (avortement) et leur poids potentiel
Remplissage du grain	- Arrêt de la photosynthèse - Remobilisation vers les grains d'assimilant précédemment stockés - Abaissement du poids de 1000 grains

Source : Deumier *et al.*, 1990.

1.3.2. Baisse de fertilité du sol

La baisse de la fertilité du sol est due à une diminution de la matière organique du sol entraînant une perte en éléments nutritifs. Il est évident que cette baisse de fertilité entraîne une baisse des rendements. En Afrique Subsaharienne, les systèmes de production agricole manque de durabilité du fait de la pression démographique (Dzotsi, 2002). De nombreuses études ont montré que les déficiences les plus connues en éléments nutritifs dans les sols tropicaux sont le phosphore et l'azote (Bationo *et al.,* 1991 ; Jansen, 1992). L'azote (N) occupe une place de choix dans la fertilisation des céréales. Il est la clé déterminante de la qualité de la matière organique, pivot de la fertilité du sol (Sedogo *et al.*, 1994 ; Nacro, 1997). En effet, un stress en N durant la phase végétative allonge la durée de cette phase. L'effet contraire est observé lorsque le stress se manifeste après la floraison femelle (période de remplissage des grains). Il faut mentionner que la faiblesse du taux de matière organique de certains types de sols ne permet pas de rentabiliser l'apport d'engrais minéraux.

1.3.3. Acidité du sol

Les sols acides sont caractérisés par leur déficience en phosphore, calcium et magnésium, et leur toxicité en aluminium (Dzotsi, 2002). En effet, les ions aluminium (Al^{3+}) échangeables et dissous dans la solution du sol sont très toxiques pour la plupart des organismes (Ahmadi *et*

al., 2006). Il faut noter que la baisse de la teneur en carbone organique des sols due à l'exportation des résidus de récolte est une des principales causes de leur acidité. Cette acidité provoque par conséquent une baisse de la productivité des sols. L'acidité semble être un indicateur de qualité du sol (Giasson & Jaouich, 2008).

1.3.4. Maladies

Diverses maladies causées par des champignons, des bactéries, des virus entraînent d'importantes pertes de rendement au champ. Quelques-unes des plus importantes sont : les pourritures des épis dues aux champignons comme *Aspergillus niger* ou *Fusarium monoliforme*, le mildiou du maïs, la rouille américaine, le charbon, les brûlures des feuilles, la striure du maïs (Rouanet, 1984 ; Ahmadi *et al*, 2006).

1.3.5. Mauvaises herbes

A travers leur compétition avec les cultures pour l'eau, les nutriments et la lumière, les mauvaises herbes ont une incidence néfaste sur le rendement pouvant atteindre des niveaux très importants. Le maïs est sensible à la concurrence des mauvaises herbes jusqu'au stade 12 feuilles (Rouanet, 1984).

1.3.6. Attaque des insectes

Les insectes attaquent les cultures soit au champ entraînant des dégâts sur les tiges (il s'agit des borers), les racines (rootworms), les feuilles (aphides, criquets) ; soit à la postproduction rendant parfois inutilisables les grains en entrepôt. Ces derniers dégâts sont surtout dus aux charançons, aux grands capucins et aux capucins des grains.

II. Gestion Intégrée de la fertilité du sol

2.1. Définition de la fertilité du sol

Le concept de la fertilité des sols est très ancien et très complexe. La définition de la fertilité du sol a évolué avec le temps. Autrefois, elle était perçue comme une conséquence directe de la qualité de la terre décrite parce qu'on peut observer, sans mesures chimiques : la texture essentiellement (Delville, 1996). Selon cet auteur, la notion de fertilité est donc ambiguë. Elle renvoie à la fois aux caractéristiques du sol et à ce qu'en fait l'agriculteur (cultures et techniques). Ainsi selon le RECA (2010), la fertilité du sol pour un agriculteur, c'est sa capacité à fournir aux plantes cultivées les éléments nutritifs dont elle a besoin pour se

développer et donner des graines, des fruits, des tubercules ou des feuilles en quantités importantes. Pour le MFAA (2006), la fertilité du sol désigne l'aptitude du sol à assurer de façon soutenue et durable la croissance des plantes et l'obtention de récoltes. La fertilité du sol résulte de la combinaison de ses composantes physicochimiques et biologiques qui détermine l'approvisionnement des plantes en éléments nutritifs et les conditions de croissance et fonctionnement des racines.

2.2. La fertilisation du maïs

Le maïs exige pour sa croissance et sa production, des éléments minéraux qu'il puise dans le sol. L'azote est un facteur important dans la fertilisation du maïs. Il faut souligner l'exigence particulière en azote juste avant la floraison pour permettre une formation normale de l'épi. (Ahmadi *et al*, 2006). Les éléments nutritifs majeurs tels que l'azote, le phosphore et le potassium sont connus pour leur action directe sur les principaux processus de développement et de l'accumulation de masse par la plante (Dzotsi, 2002). Un manque d'azote et les autres éléments fertilisants peuvent occasionner des pertes de rendements (Rabat, 2003). Le phosphore joue un rôle important dans l'amélioration et le maintien de la matière organique des sols en stimulant la croissance, la densité et la longueur des racines, qui sont des sources de matière organique stables et résistantes à la biodégradation (Lompo, 2009).

En effet, les études de nombreux auteurs (Bationo *et al*, 1991 ; Mokwunye *et al.*, 1996 ; Bekunda *et al.*, 1997) ont démontré que l'azote et le phosphore sont les deux premiers facteurs limitant les rendements des cultures sur les sols en Afrique. Les pertes de ces éléments nutritifs dans les sols entraînent une baisse de la fertilité des sols et une diminution progressive des rendements des cultures (Bado *et al.*, 1997). La teneur en matière organique du sol s'avère donc une des clés de production intensive du maïs.

2.3. Contraintes à la gestion de la fertilité des sols

Il est largement reconnu que la faible fertilité des sols est la principale contrainte à la production dans l'agriculture des petits exploitants en Afrique (Vanlauwe et Giller, 2006). En effet, les pays de l'Afrique subsaharienne figurent parmi ceux qui enregistrent les taux d'épuisement des nutriments les plus élevés dans le sol (Stoorvogel et Smaling, 1990).

Après les récoltes, les résidus de récolte sont principalement consommés durant la saison sèche par les animaux transhumants, ce qui correspond à une exportation d'éléments nutritifs des champs. Cette agriculture extensive à très faibles intrants sans recyclage des résidus de

récolte entraîne des bilans négatifs en éléments nutritifs et ne permet pas d'entretenir la fertilité des sols à long terme (Bado, 2002 ; Drabo, 2009).

En Afrique en général et au Burkina Faso en particulier, les modes d'exploitation des sols sont essentiellement de type « minier » (Kabore, 2010), ce qui a conduit inexorablement à une raréfaction de la ressource organique. Plusieurs facteurs concourent à cet état des faits dont le plus important est la minéralisation (Kabore, 2010). En effet, la matière organique (MO) « morte » subit une série de biotransformations : décomposition et finalement minéralisation par des micro-organismes, avec libération de CO_2 et la vitesse de ces phénomènes dépend de la composition de la MO et des conditions physico-chimiques locales (humidité, température, oxygène, etc.).

Par ailleurs, en plus de la minéralisation, plusieurs autres facteurs liés aux changements climatiques, à la forte croissance démographique et à l'inadéquation des pratiques agricoles concourent à accentuer cette dégradation de la matière organique du sol (MOS) et la raréfaction des ressources organiques à l'échelle des écosystèmes (Youl, 2009). Sanchez *et al.* (1997) ont conclu que l'épuisement de la fertilité des sols dans les petites exploitations agricoles constitue la principale cause biophysique de la baisse de la production alimentaire par habitant en Afrique.

C'est au regard de ces contraintes que les méthodes de gestion intégrée des éléments nutritifs qui associent engrais minéraux importés, amendements organiques, minéraux locaux et techniques de conservation des eaux et des sols sont considérées aujourd'hui comme des alternatives techniques pour restaurer et améliorer la fertilité des sols (Bekunda, 1999 ; Breman *et al.*, 2001 ; Breman et Debrah, 2003 ; Ouédraogo, 2005).

2.4. Pratiques de gestion intégrée de la fertilité des sols

Le paradigme actuel de la gestion de la fertilité des sols tropicaux prône une nouvelle approche qu'est la gestion intégrée de la fertilité des sols (GIFS). La GIFS préconise l'utilisation maximale des ressources localement disponibles et l'application combinée des intrants organiques et minéraux, économiquement et socialement acceptable (Vanlauwe, 2004). La GIFS qui est une composante de l'intensification intégrée, vise à accroître la productivité des sols grâce à une restauration et à une amélioration économique de leur fertilité par l'utilisation rentable des engrais organiques et minéraux, accompagnée par les techniques de conservation des eaux et des sols (Breman, 1997 ; Breman et Debrah, 1999 et Dudal 2002). Une masse croissante d'analyses économiques confirment les effets positifs de la gestion intégrée de la fertilité des sols (GIFS) sur les rendements et les revenus (Kelly *et*

al., 2003). La GIFS permet non seulement de préserver les ressources environnementales pour la communauté toute entière, mais aussi et surtout d'optimiser les coûts de production et les rendements au niveau de l'entreprise agricole individuelle (Steichen, 1994).

De nombreuses expérimentations de longue durée ont montré qu'une gestion rationnelle des engrais minéraux et des amendements organiques permettait d'augmenter les rendements des cultures et de maintenir durablement la fertilité des sols (Bationo et Mokwunye, 1991 ; Sedogo, 1993 ; Bado et *al.*, 1997). Ainsi, les pratiques d'amendements organiques et l'utilisation rationnelle des engrais minéraux s'avèrent être des stratégies incontournables de gestion intégrée de la fertilité du sol.

2.4.1. Pratiques d'amendements organiques

Au Burkina Faso, des travaux de nombreux auteurs (Mando, 1998 ; Ouédraogo *et al.*, 2001 ; Ouédraogo *et al.*, 2007) ont montré que les ressources organiques en plus de fournir des nutriments, permettent d'amender le sol. En effet, elles améliorent la capacité de rétention en eau, réduisent l'érosion et augmentent l'infiltration et améliorent le taux de recouvrement à travers leur impact sur la Capacité d'Echange Cationique (CEC), la pénétration des racines et sur les organismes du sol. L'apport de ressources organiques permet une utilisation efficiente des nutriments apportés sous forme d'engrais.

Cependant, l'apport des ressources organiques dont les teneurs sont élevés en lignine et en polyphénol entraîne l'immobilisation de l'azote. Par contre, cet apport montre des effets positifs sur la croissance des cultures dans certaines conditions telles que la sécheresse (Vanlauwe *et* al., 2001) ou l'érosion éolienne dans le Sahel (Bationo *et al.*, 2004). Afin d'éviter cette immobilisation de l'azote, il est nécessaire de combiner des apports organiques et minéraux.

2.4.2. Utilisation des engrais minéraux dans l'amélioration de la fertilité des sols

Un engrais désigne tout matériau organique ou minéral d'origine naturelle ou synthétique (autre que le matériau de chaulage) qui est ajouté à un sol pour fournir un ou plusieurs éléments nutritifs essentiels à la croissance des plantes (Lesschen *et al.*, 2005). Ainsi l'azote (N), le phosphore (P) et le potassium (K) peuvent être fourni par l'engrais sans oublier d'autres éléments indispensables tels que le calcium (Ca), le magnésium (Mg), le soufre (S), le bore (B), etc.

Le processus de matière organique étant lent en matière d'apport d'éléments, l'utilisation de la fumure minérale s'avère indispensable pour compenser les besoins de la plante à des

moments précis de sa croissance. Afin d'améliorer la productivité agricole et faire face aux défis alimentaires et de réduction de la pauvreté en Afrique de l'Ouest, l'utilisation efficace des engrais minéraux s'avère donc incontournable.

III. Approche de modélisation : le modèle DSSAT

3.1. Les systèmes d'aide à la décision en agriculture

Les systèmes d'aide à la décision sont des systèmes informatiques conçus pour assister l'utilisateur dans la résolution de problèmes complexes et l'aider dans la prise de décisions particulières (Newman *et al.*, 1999). Ils permettent également d'analyser les risques et les opportunités associés à diverses options afin d'en choisir les plus prometteuses. En agriculture, le souci du chercheur ou du producteur ne réside pas seulement dans la compréhension du système de production agricole, de son fonctionnement et des résultats qu'il peut fournir, mais aussi dans la résolution des problèmes se posant au sein du système, non seulement aujourd'hui, mais encore dans 10, 25, 50 ans. Les systèmes d'aide à la décision offrent les possibilités d'explorer le futur et pourvoient une base de référence pour des prises de décision (Dzotsi, 2002). La spécification d'un système est étroitement dépendante de sa finalité. Pour l'agronome qui souhaiterait explorer comment les effets de gestion de la fertilité du sol, des dates de semis, des pratiques culturales et les différents intrants influencent la production du maïs, le complexe eau-sol-plante est la charpente autour de laquelle sera construit son système (Dzotsi, 2002).

Cependant, en raison de leurs limites, les outils d'aide à la décision doivent être employés avec précautions et il est important de garder à l'esprit qu'ils ne peuvent suppléer l'activité de prise de décision. Ils constituent juste un outil pour orienter dans la prise de décision.

3.2. La modélisation et l'importance des modèles agricoles dans l'agriculture

La modélisation est l'activité qui consiste à convertir un système défini en un modèle. Un système est un ensemble d'éléments interagissant entre eux en harmonie de telle sorte qu'une modification en un point donné c'est-à-dire une affectation d'un des éléments entraîne un changement conséquent du comportement de tout le système. Le modèle est donc une représentation statique ou dynamique, subjective, simplifiée et sélective de la réalité (Struif Bontkes, 1999).

Les modèles permettent d'examiner des questions de recherche scientifique avant de procéder à une expérimentation réelle ou avant de prendre une décision.

Plusieurs modèles d'utilité agricole sont connus mais il est possible de les regrouper selon plusieurs critères. Le plus simple des critères permet de distinguer deux grandes catégories : les modèles dynamiques et les modèles statiques. Les modèles dynamiques incorporent le concept de temps par contre les modèles statiques ne prennent pas en compte le concept de temps (Dzotsi, 2002).

Les modèles dynamiques simulent la dynamique de croissance, de développement, le rendement des cultures voire les différents stress environnementaux agissant sur les cultures. Ils nécessitent des données d'entrée sur le sol, le climat, le type variétal de la culture, les stades phénologiques, les stress en eau et en azote sous forme de fichiers de sortie numériques ou graphiques. La plupart des modèles de simulation agricoles sont déterministiques c'est-à-dire réagissent à une variation des données d'entrées par une modification concomitante dans les données de sortie (Keating et Grace, 1999). Ils présentent ainsi un grand intérêt dans l'étude de sensibilité de différentes composantes de la production agricole en relation avec la variabilité bien connue dans le climat et la fertilité des sols dans le temps. A partir des données historiques et des données d'extrapolation sur le climat et le sol notamment, le chercheur pourra simuler les décisions de semis, le comportement d'une variété dans le long terme, l'impact des associations et des rotations culturales sur le rendement (Jones *et al.*, 1994).

Comme exemple de modèles statiques, le modèle QUEFTS (Quantitative Evaluation of the Fertility of Tropical Soils) en est un. Concernant les modèles dynamiques, de nombreux modèles ont été développés pour la simulation de la croissance des cultures céréalières. Parmi ces modèles, il y a deux systèmes de modélisation des cultures qui peuvent être utilisés dans le cas de l'Afrique de l'Ouest : DSSAT (Decision Support System for Agro-technology Transfer) et APSIM (Agricultural Production Systems Simulator).

Le logiciel DSSAT est très interactif et accessible gratuitement pour plusieurs utilisateurs sur le site internet (http://www.icasa.net/dssat/index.html) qui est celui du *International Consortium for Systems Applications in Agriculture (ICASA)* (Struif Bontkes et Wopereis, 2003). Par contre, le logiciel APSIM ne peut être utilisé que par des utilisateurs disposant d'une licence, mais une version de démonstration peut être téléchargée sur Internet. Les droits de propriété intellectuelle qui protègent APSIM interdisent tout accès ou apport de modifications à son code source. En revanche, DSSAT donne la possibilité de changer le code, de faire des recommandations à l'équipe de développement, qui peut ensuite incorporer ces suggestions dans les versions suivantes.

Ce qui justifie le choix de DSSAT dans cette étude. En simulant les effets probables des stratégies de conduite des cultures, DSSAT donne aux utilisateurs des informations pour évaluer rapidement de nouvelles cultures et pratiques culturales.

Les défauts majeurs de concordance entre simulations et mesures sont dus à des conditions qui ne sont pas prises en compte par DSSAT, comme l'infestation par les mauvaises herbes, les dégâts causés par les oiseaux et l'effet d'ombrage des arbres. Il est donc important de connaître les limites d'un modèle et d'éliminer ou de minimiser les effets des facteurs qui ne sont pas simulés par le modèle, par exemple par un sarclage ou la pulvérisation d'herbicides. (Struif Bontkes et Wopereis, 2003).

3.3. Présentation du modèle DSSAT

Le système agro-technologique d'aide à la décision DSSAT (Decision Support System for Agro-technology Transfer) a été développé par International pour Agro-Technologie Transfert (IBSNAT). DSSAT est un système destiné à aider l'utilisateur à concilier les besoins biologiques des cultures avec les caractéristiques des sols et du climat (Tsuji *et al.* 1994). Selon Jones et *al.* (2003), le projet DSSAT a été conçu vers les années 1988 par l'IBSNAT en vue d'améliorer les processus de prise de décision en agriculture. C'est un modèle de la croissance de la plante qui intègre les effets du sol, le climat, la gestion, la génétique et les maladies des cultures pour observer la variabilité du rendement dans le temps et dans l'espace. Pour Hoogenboom *et al.* (1999), DSSAT est un logiciel de micro-ordinateur. La **figure 2** donne les modèles agricoles incorporés dans le système DSSAT.

Il a été utilisé depuis plus d'une quinzaine d'années par des chercheurs partout dans le monde à divers buts incluant la gestion des cultures (Fetcher *et al.*, 1991), les études d'impacts sur les changement climatiques (Alexandrov et Hoogenboom, 2001), l'agriculture de précision (Paz *et al.*, 2001, 2003), les recherches durables (Quemada et Cabrera, 1995) et est bien validé pour un nombre donné de cultures et de régions.

Le logiciel DSSAT est un outil d'aide à la décision qui permet d'identifier des périodes idéales de semis, d'apport de fumure en fonction de la variété cultivée tout en tenant compte de la variabilité climatique (Dzotsi, 2002). Le modèle DSSAT peut simuler la réduction de rendement par le stress hydrique et le stress d'azote en utilisant les données climatiques journalières enregistrées et les caractéristiques physiques, chimiques et morphologiques du sol comme entrées du modèle (Nurudeen, 2011).

Les modèles agricoles incorporés dans le système DSSAT comprennent :

- la famille de modèles CERES pour les céréales : CERES-Maize pour le maïs, CERES-Wheat pour le blé, CERES-Barley pour l'orge, CERES-Sorghum pour le sorgho et CERES-Millet pour le mil ;
- la série des modèles CROPGRO pour les légumineuses : CROPGRO-Soybean pour le soja, CROPGRO-peanut pour l'arachide, et CROPGRO-dry bean pour le haricot;
- la série CROPSIM pour les tubercules : CROPSIM-Cassava pour le manioc et SUBSTOR-Potato pour la pomme de terre ;
- et divers autres modèles permettant de simuler la croissance et le développement de la canne à sucre, du tournesol, des fourrages.

Les modèles utilisent les informations pourvues par le système des bases de données pour simuler les essais exécutés pour une saison de culture.

Wafula (1995) a adapté le modèle CERES-Maize de DSSAT pour les conditions agro climatiques des régions semi-arides du Kenya. Cette version du modèle a été utilisée dans l'élaboration d'un système durable de production du maïs où dates de semis, cultivars de maïs, densité de semis, niveaux de fertilisation étaient des variables à optimiser. Les résultats auxquels Wafula a abouti ont été d'un intérêt pour la vulgarisation agricole au Kenya.

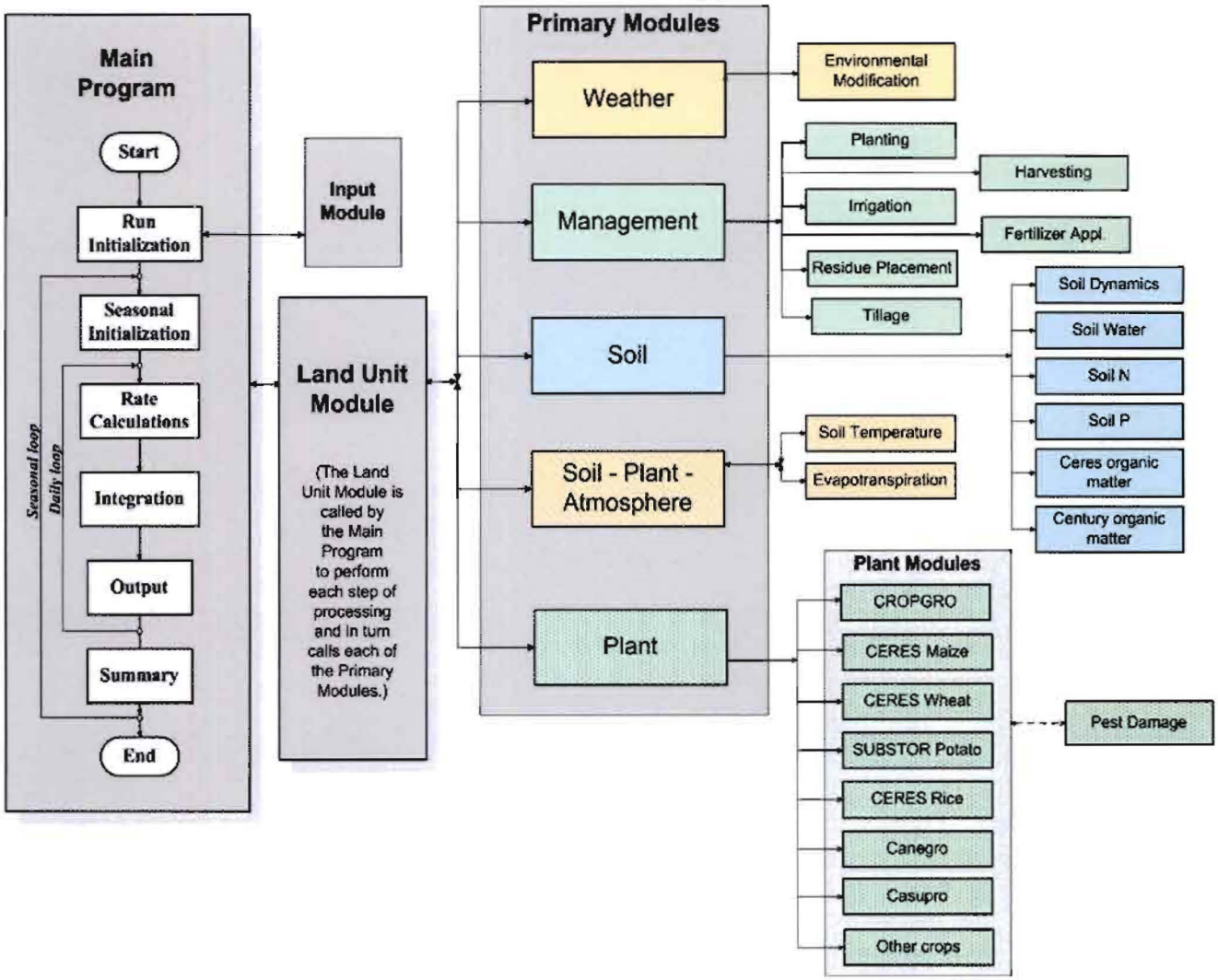

Figure 2 : Coquille du système DSSAT montrant les principaux modules.

Source: JONES et al., 2003.

Conclusion sur la synthèse bibliographique

De cette synthèse bibliographique, il ressort que le problème de baisse généralisée de la fertilité des sols en Afrique Subsaharienne est reconnu crucial par de nombreux chercheurs. Aussi, il s'est avéré que les pratiques de la gestion intégrée de la fertilité des sols notamment l'utilisation combinée et raisonnée de la fumure organo-minérale demeure une issue incontournable afin d'intensifier la production végétale, et surtout d'assurer une durabilité des systèmes.

Cette synthèse bibliographique a également fait ressortir l'importance de la fertilisation raisonnée dans la production des cultures en général et surtout celle du maïs. Compte tenu du fait des déficiences des sols tropicaux en phosphore et en azote, des efforts de recherche ont été faits quant à l'utilisation rationnelle et judicieuse des engrais minéraux dans l'amélioration

de la fertilité du sol et l'intensification de la production végétale. Cependant, les mêmes doses d'engrais sont appliquées pour différentes cultures et dans différentes zones agricoles malgré la variabilité du climat et des sols au Burkina Faso. Il s'avère donc nécessaire de proposer et de recommander des doses d'engrais appropriées pour chaque culture et en fonction des types de sol et de chaque zone agroécologique.

L'approche système qui prend en compte les connaissances sur le milieu, des acteurs, et associe l'utilisation des modèles agronomiques tels que DSSAT constitue une approche efficace permettant de proposer assez rapidement des options de fertilisation adaptées permettant d'accroître les rendements.

C'est dans ce cadre que notre étude s'inscrit avec pour ambition d'y intégrer l'effet des densités de semis en fonction du mode de gestion de la fertilisation pour une intensification de la production du maïs dans la zone de l'Est du Burkina Faso.

CHAPITRE 2 : MATERIELS ET METHODES

I. Cadre de l'étude

L'étude a été conduite à Kouaré, station de recherches agronomiques de la Direction Régionale de Recherches Agricoles (DRREA) de l'Est. Sa superficie totale est de 1000 ha dont 50 ha sont exploités

1.1. Situation géographique

La station de recherche est située dans le village de Kouaré, à une dizaine de kilomètre au Sud-Ouest de Fada N'Gourma chef lieu de la province, sur l'axe Fada N'Gourma – Coming-Yanga. Elle est à 305 m d'altitude et s'inscrit en parallèle entre 12°05'N et 11°55'S et en méridien entre 0°10' et 0°25'E (Figure 3).

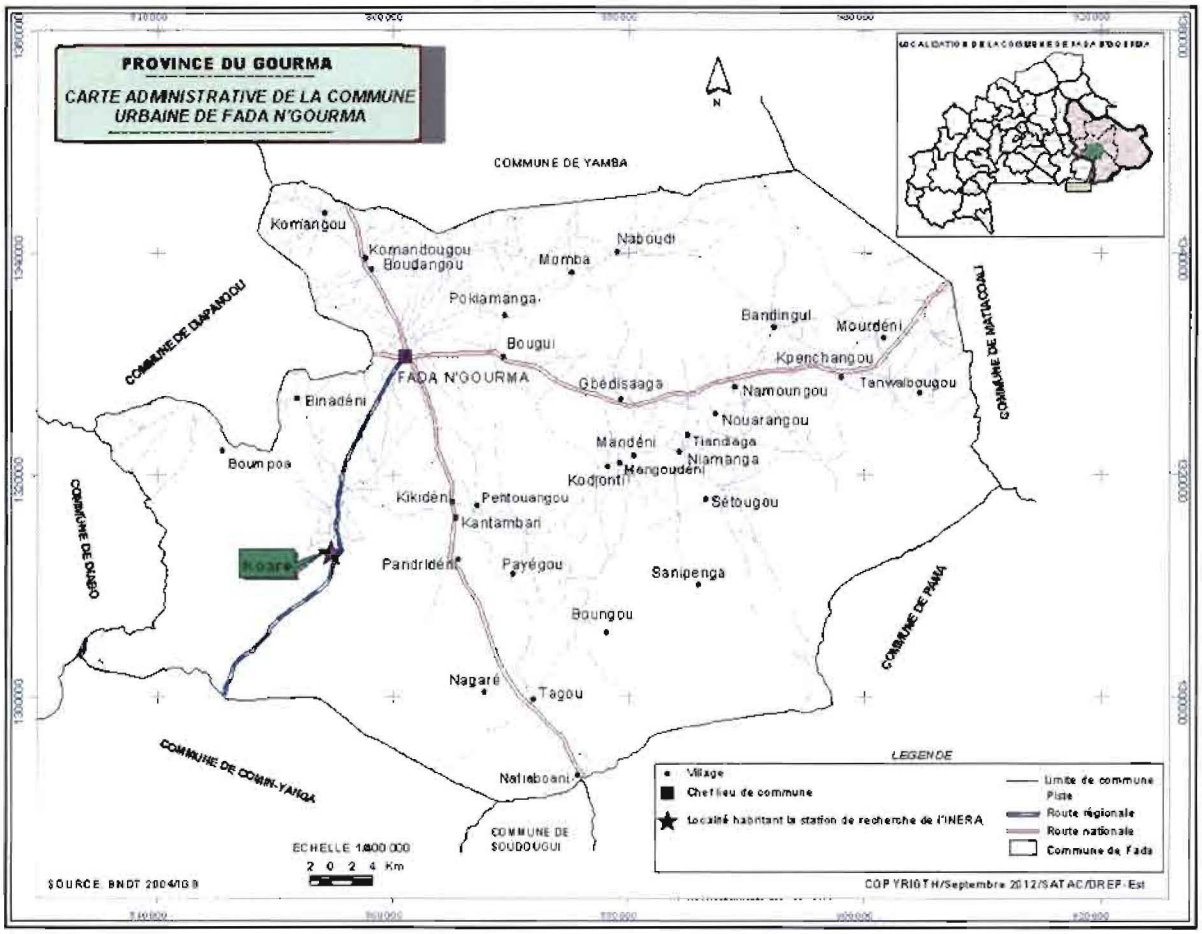

Figure 3 : Carte de localisation du site d'étude.

Source : INSD, 2012.

1.2. Climat

Le climat de type Nord Soudanien est marqué par deux saisons: une saison pluvieuse avec la remontée de la mousson (vent chaud et humide d'origine océanique) et une saison sèche de 8 mois (Octobre à Mai) avec la prédominance de l'harmattan qui est un vent sec et poussiéreux venant du Sahara. La pluviosité moyenne annuelle est de 800 mm environ et la saison des pluies de la zone dure en moyenne 4 mois. Très irrégulièrement réparties d'une année à l'autre, les précipitations présentent un maximum en Août qui peut être décalé en juillet et rarement en Septembre. L'évapotranspiration annuelle estimée à 1995 mm, varie beaucoup au cours de l'année. Le maximum annuel est atteint entre mars et juin. La température moyenne annuelle varie de 24°C à 33°C. L'amplitude thermique moyenne est de l'ordre de 8,5 °C (Zomboudré, 2003).

Les précipitations annuelles de 2002 à 2012 sont comprises entre 658 mm à 1058,7 mm. Les données pluviométriques des dix dernières années (2002-2012) montrent une variabilité interannuelle de la pluviosité de la zone (Figure 4). La plus faible hauteur d'eau tombée a été enregistrée en 2002 avec 658 mm répartie sur 65 jours et la plus forte en 2003 avec 1058,7 mm répartie sur 71 jours. Pour la campagne 2012, une pluviosité totale de 702,5 mm répartie sur 44 jours a été mesurée avec une hausse de 18,3 mm d'eau par rapport à celle de 2011. Les pluies ont démarré au mois de Mars avec 6 mm de pluie en un jour, suivi d'une rupture en Avril et se sont arrêtées dans le mois de novembre avec 3 mm d'eau en un jour. Le mois de Septembre a enregistré la plus grande quantité de pluie de 211 mm répartie sur 10 jours (**Figure 5**).

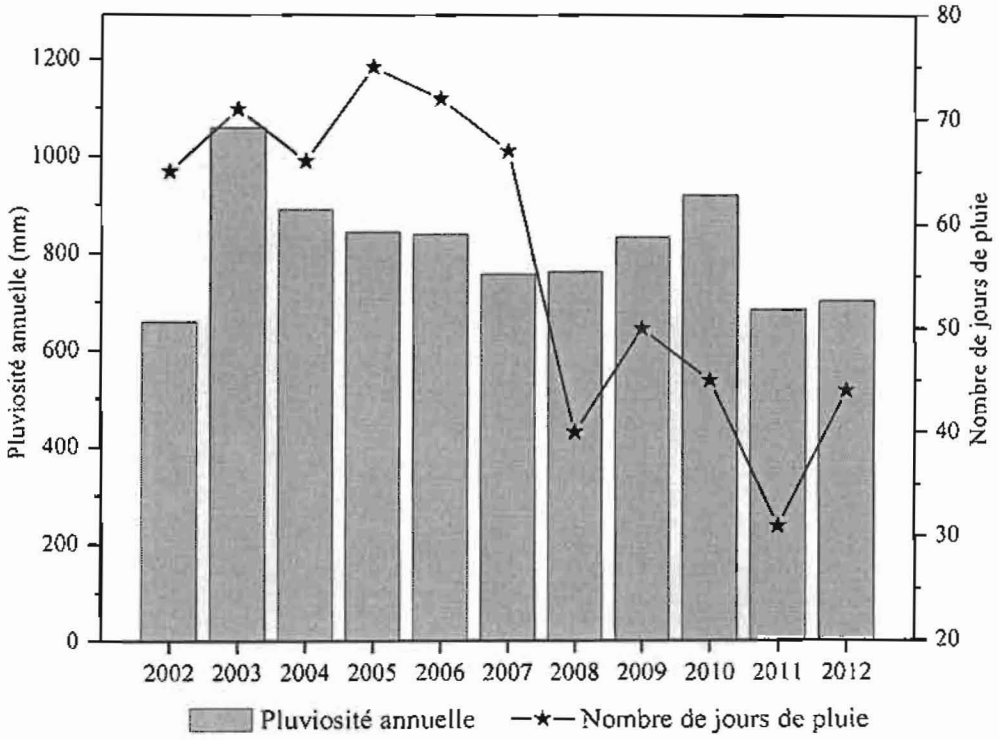

Figure 4 : Quantité et nombre de jours des dix dernières années à Kouaré

Source : INERA, 2012.

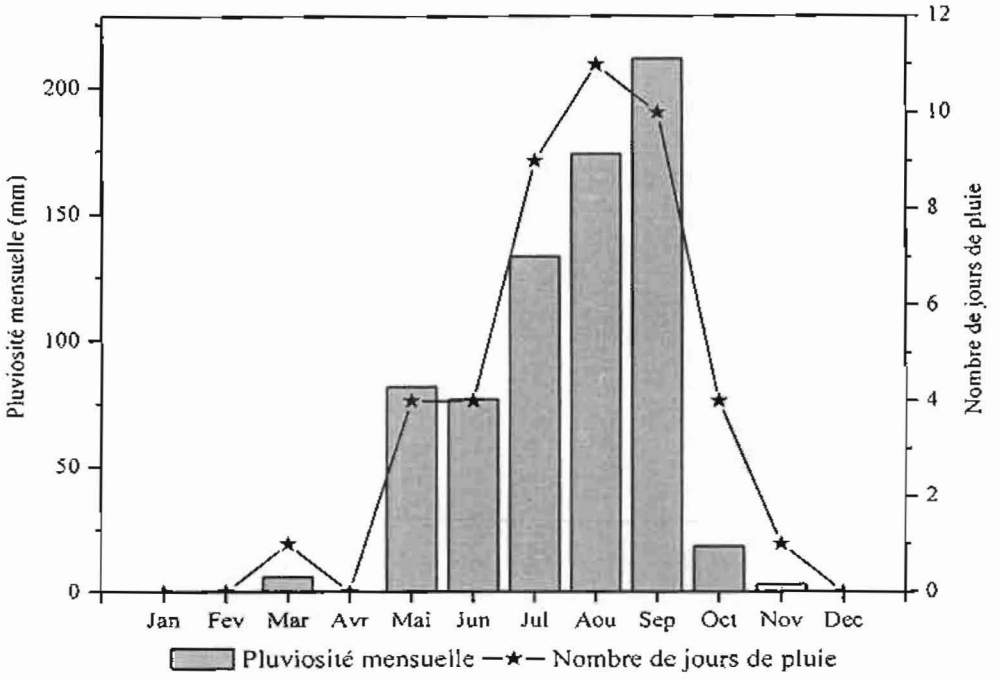

Figure 5: Pluviosité de la campagne 2012 à Kouaré.

1.3. Géologie et Géomorphologie

Des formations cristallines du précambrien "D"ou anté-birrimien couvrent la quasi-totalité du secteur, où migmatites et granites indifférenciés, en affleurement inégalement reparties, sont les roches les plus rencontrées (INERA, 1993). A ceux-ci, il faut ajouter le groupe des roches plutoniques du précambrien "C" ou Birrimien, les granites à biotites et muscovites.

La géomorphologie de la station est celle d'un modelé à versant caractérisé par des interfluves courts et à sommets convexes. Le modelé est ponctué par endroit par des buttes et affleurements cuirassés et des îlots de buttes et affleurements rocheux (roches vertes, granites, grès) (INERA, 1993).

1.4. Sols

Les sols de la zone d'étude sont de types ferrugineux tropicaux lessivés indurés peu profonds. La profondeur utile du sol est de 40 cm, la charge graveleuse nulle en surface, devient importante en profondeur (environ 80%) (INERA, 1993). Les caractéristiques physico-chimiques (**Tableau II**) du sol montrent qu'il est de texture limono-sableuse. Ce sol est pauvre en argile et est acide (4,73< pH<5,03). Il est aussi pauvre en matière organique dont le taux est de 0,47 % dans les 20 premiers cm et 0,42 % dans les horizons 20-30 cm. Les taux d'éléments nutritifs (N, P et K) disponibles sont faibles dans le sol. Le rapport C/N dans les horizons superficiels est compris entre 12 et 13.

Tableau II : Caractéristiques physico-chimiques du sol avant l'implantation de l'essai

Horizon (cm)		0 – 10	10 - 20	20 - 30
TEXTURE		**LS**	**LS**	**LS**
Argile	%	5,88	7,84	13,73
Limons totaux	%	21,57	21,57	17,64
Sables totaux	%	72,55	70,59	68,63
Matière organique totale	%	0,474	0,474	0,424
Carbone total	%	0,275	0,275	0,246
Azote total	%	0,022	0,022	0,020
C/N		13	13	12
Phosphore total	(ppm)	72,5	64,5	64,5
Phosphore assimilable	(ppm)	4,35	8,26	3,48
Potassium total	(ppm)	525,6	615,7	713,3
Potassium disponible	(ppm)	51,70	39,77	25,85
pH eau (p/v: 1/2,5)		5,03	4,73	5,00

Source : IFDC (2012) ; **ppm** : partie par millions ; **LS** : Limono-Sableux

1.5. Hydrographie

Le territoire de la commune de Fada fait partie du bassin versant du Niger au Nord et de celui de l'Oti au Sud. Dans la zone d'étude, le réseau hydrographique est très pauvre. Il comprend un drain à l'extrême Ouest de la station de Kouaré correspondant à la zone de collecte d'eau (INERA, 1993).

1.6. Végétation

La commune de Fada N'Gourma appartient au domaine climatique Nord Soudanien ; sa végétation est composée essentiellement de savane arborée, de savane boisée par endroit surtout vers le Sud et l'Est, et de savane arbustive (Fontes et Guinko, 1995). Sa tendance générale est à la dégradation du fait de la pression anthropique car les ménages consomment essentiellement le bois (PCD, 2008). La végétation du site d'étude est de type savane arbustive dense. La formation végétale se compose de deux strates : une strate supérieure constituée de grands arbres tels que *Parkia biglobosa* (Jacq.) Benth., *Lannea microcarpa* Engl. et Kr., *Tamarindus indica* L., *Sclerocarya birrea* (A. Rich.) Hochst., *Vitellaria paradoxa* Gaertn., etc ; une strate inférieure constituée d'arbustes dont les principales espèces sont : *Guiera senegalensis* J.F.Gmel, *Cassia sieberiana* DC., *Lannea microcarpa* Engl. et Kr., *Combretum glutinosum* Perr. ex DC., *Combretum micranthum* G. Don, etc. La strate herbacée est composée d'espèces variées où dominent *Loudetia togoensis* Hubb., *Cymbopogon schoenanthus* (L.) Spreng., *Andropogon gayanus* Kunth., *Pennisetum pedicellatum* Trin., *Sporobolus pyramidalis* P. Beauv., *Digitaria horizontalis* Willd., *Vetiveria nigritana* (Benth.) Stapf (INERA, 1993).

1.7. Population

Selon les données du dernier recensement de la population et de l'habitat de 2006, le village de Kouaré comptait 5202 habitants dont 2605 hommes et 2597 femmes. La population autochtone est gourmantché. Du point de vue de la composition sociale, les principales ethnies qui cohabitent au sein de la commune sont les gourmantchés, les Zaoussé, les Yaana, les Mossi et les Peulh.

1.8. Principales activités

L'agriculture et l'élevage constituent les principales activités socio-économiques menées par la population du village du Kouaré. Ils constituent les principales sources de revenus pour plus de 85% de la population (PCD, 2008). Aussi bien en termes de superficies emblavées

qu'en termes de quantités produites, les cultures céréalières sont prépondérantes dans presque tous les villages de la commune de Fada N'Gourma. Parmi les cultures vivrières, le maïs est la spéculation la plus produite suivie du sorgho, le mil et le riz sont faiblement produits.

II. Matériels

2.1. Matériel végétal

Le matériel végétal utilisé est la variété de maïs BARKA provenant de la station de recherche de Farako-Bâ. Cette variété est bien adaptée à la zone nord soudanienne et résulte d'un brassage de six lignées résistantes à la sécheresse (Sanou, 2007). Le **Tableau III** présente les caractéristiques de la variété et la zone climatique apte à sa zone de culture.

Tableau III : Caractéristiques de la variété du maïs Barka

Couleur du grain	Zone de pluie	Semis Floraison-Mâle	Semis-Floraison maturité	Rendement potentiel
Blanche	< 750 mm	42 JAS	80 JAS	5,5T/ha

Source : Sanou, 2007.

2.2. Fertilisants

Au cours de l'expérimentation, la fumure minérale et la fumure organique ont été utilisées.

Les engrais minéraux apportés sont :

- l'Urée (46% de N) ;
- le DAP (Di-Ammonium Phosphaté) composé de 18% de N + 46% de P2O5 ;
- l'engrais complexe NPKSB de formule 14-23-14-6-1.

La matière organique est constituée de fumier de parc. Le **tableau IV** donne les caractéristiques chimiques du fumier. La fumure organique a été apportée à la dose de 2,5 tonnes à l'hectare (soit 6,25 kg par parcelle de 25 m^2) dans les parcelles à fumer. Cette matière organique a été enfouie par un sarclage manuel, juste après le labour et avant le semis à la date du 17/07/2012.

Tableau IV : Caractéristiques chimiques du fumier

Azote total	Phosphore total	Potassium total
% N	% P	% K
1,52	0,20	1,31

Source : IFDC (2012)

2.3. Sol

L'essai a été mis en place sur un sol ferrugineux tropical lessivé induré peu profond. Le profil de ce sol décrit dans le **tableau V** est utilisé pour la simulation. C'est un sol profond, légèrement acide avec une accumulation d'argile en profondeur, une teneur faible en matière organique (inférieure à 0,5 %) et un rapport C/N proche de 10.

Tableau V : Caractéristiques physico-chimiques d'un profil du sol du site d'étude

Horizon (en cm)		0_32	32_46	46_65	65_125
TEXTURE		**LS**	**LAS**	**LA**	**LA**
Argile	%	5,88	9,8	17,65	37,25
Limons totaux	%	21,57	17,65	17,64	15,69
Sables totaux	%	72,55	72,55	64,71	47,06
Matière Organique totale	%	0,536	0,44	0,455	0,412
Carbone total	%	0,311	0,255	0,264	0,239
Azote total	%	0,027	0,023	0,023	0,023
C/N		12	11	11	10
Phosphore total	(ppm)	56,4	48,3	48,3	64,4
Phosphore assimilable	(ppm)	2,37	0,69	0,41	0,12
Potassium total	(ppm)	719,5	1039,3	1518,9	2398,3
Potassium assimilable	(ppm)	68,58	20,57	7,84	19,59
pH eau	(P/V : 1/2,5)	5,55	5,26	4,93	5,22
pH KCl	(P/V : 1/2,5)	4,13	3,87	3,67	3,97

Source : IFDC (2012) ; **ppm** : partie par millions.

III. Méthodes

3.1. Dispositif expérimental

Le dispositif est un split-split-plot avec quatre répétitions (**Figure 6**). Une allée de 2 m sépare deux répétitions consécutives. Il est composé de trois niveaux de facteurs dont :

- Facteur 1 : matière organique en grandes parcelles
  - Sans matière organique
  - Avec matière organique

- Facteur 2 : densité de semis en petites parcelles
  - D1 : 80 cm x 40 cm (62500 plants/ha)
  - D2 : 70 cm x 40 cm (71500 plants/ha)
  - D3 : 60 cm x 40 cm (83500 plants/ha)
- Facteur 3 : Fertilisation en plus petites parcelles
  - F1 : Témoin sans engrais
  - F2: 2 DAP (18%N + 46% P2O5) + 2,5 Urée (46%N) : (75,5N-20P)
  - F3: 4 NPK (14-23-14-S-B) + 2 Urée (46%N) : (74N-20P-23K)
  - F4: 3 DAP (18%N + 46%P2O5) + 3 Urée (46%N): (96N-30P).

Les parcelles principales (grandes parcelles) sont séparées par des allées de 1,5 m. Chaque parcelle principale est divisée en trois petites parcelles correspondant aux trois densités de semis (0,8 × 0,4 m ; 0,7 × 0,4 m ; 0,6 × 0,4 m). Ces petites parcelles sont séparées entre elles par des allées de 1 m. Elles sont subdivisées en quatre sous parcelles (plus petites parcelles) correspondant aux options de fertilisation. Ces parcelles élémentaires ont chacune une superficie de 25 m^2 (5 m x 5 m) et sont séparées entre elles par des allées de 0,5 m. Les dimensions de l'essai sont de 100 m × 37,5 m, soit une superficie totale de 3750 m^2.

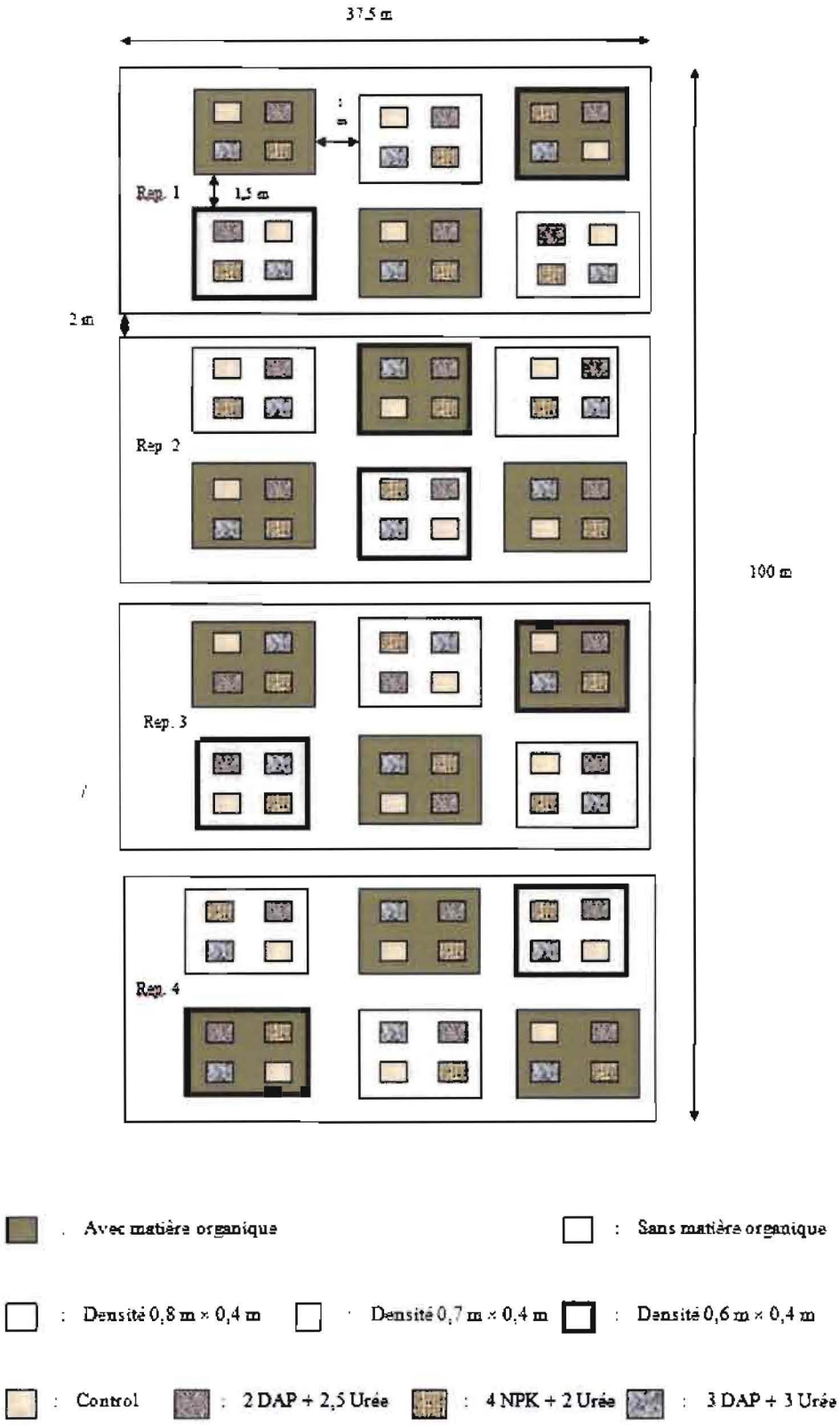

Figure 6 : Dispositif expérimental de l'essai

3.2. Conduite de l'expérimentation

❖ **Préparation du sol**

La préparation du sol a consisté en un labour croisé effectué à une profondeur d'environ 20 cm. Puis, s'en est suivi le piquetage de l'essai comme indiqué dans le dispositif expérimental. Après le piquetage, la matière organique a été épandue dans les parcelles devant la recevoir. Un enfouissement de la fumure organique par un grattage manuel a été effectué.

❖ **Semis**

Le semis a été effectué manuellement le 20/07/2012, en lignes après un rayonnage de la parcelle, à raison de 2 à 3 graines par poquet en fonction des 3 densités décrites ci-dessus.
Les parcelles utiles avec la densité D1 totalisent 6 lignes, celles avec D2 ont 7 lignes et celles avec D3 possèdent 8 lignes. Chaque ligne de semis des 3 densités contient 12 poquets. Un démariage à 2 plants par poquet a été effectué treize jours après semis (JAS). Ainsi, dans les parcelles utiles, les densités de semis étaient de 42298 plants/ha pour la D1, 51940 plants/ha pour la D2 et 58477 plants/ha pour la D3.

❖ **Entretien de la culture**

L'entretien a essentiellement consisté aux sarclages et au buttage. Deux sarclages ont été effectués manuellement pour lutter contre les adventives et un buttage à la traction animale au 45ème jour après semis pour favoriser l'aération et la rétention d'eau. La fertilisation minérale a consisté à apporter le N, P, K sous forme d'engrais complexe NPKSB et sous forme de Di-Ammonium Phosphate (DAP) qui contient du N et du P au 15ème JAS. L'urée est apportée en une seule fraction au 45ème JAS suivi d'un buttage. Aucun traitement phytosanitaire n'a été effectué.

3.3. Paramètres mesurés

3.3.1. Rendement et composantes de rendement

Les composantes du rendement ont été mesurées dans les parcelles utiles délimitées dans chaque parcelle élémentaire en éliminant une ligne de bordure de chaque côté de la parcelle et un poquet à chaque bout de la ligne de semis. Ces composantes sont: le nombre de plants récoltés, le poids des épis, le poids des grains, le poids de la paille sèche et le poids de 1000 grains. Le nombre de plants a été déterminé avant la récolte par comptage sur la parcelle utile.

A la récolte, le poids des épis, le poids de la paille sèche, le rendement grain ont été évalués à l'aide d'un peson de portée 50 kg. Le poids de 1000 grains a été évalué à l'aide d'une balance électronique.

3.3.2. Paramètres de fertilité des sols

3.3.2.1. Méthodes d'échantillonnage du sol et des substrats utilisés dans la fertilisation

Pour caractériser les substrats utilisés comme fertilisants et afin de suivre les paramètres chimiques du sol, des échantillons de compost et de sol ont été collectés.

- Trois (03) échantillons composites ont été constitués au moment de l'application des substrats à partir de 03 échantillons élémentaires pour le compost.
- Les échantillons composites de sol ont été prélevés avant la mise en place de l'essai aux horizons suivants : 0-10 cm ; 10-20 cm et 20-30 cm. Le prélèvement a été effectué à l'aide d'une tarière suivant la diagonale du terrain de l'essai en 5 points. Pour chaque horizon, un échantillon composite a été constitué. Tous les échantillons ont été séchés à l'ombre, puis tamisés à l'aide d'un tamis de 2 mm.

3.3.2.2. Analyses chimiques

Les échantillons prélevés ont été envoyés au laboratoire du Bureau national des sols (BUNASOLS) du Burkina Faso afin d'être analysés.

❖ **Détermination du pH eau du sol**

Le pH eau du sol a été mesuré à l'aide d'un pH-mètre électrique suivant le rapport sol/eau distillée de 1/2,5 (Afnor, 1981). L'acidité est un révélateur des conditions physico-chimiques et biologiques qui règnent dans le sol.

❖ **Détermination du carbone total et du taux de matière organique**

La teneur en carbone total a été déterminée selon la méthode de Walkley et Black (1934) qui consiste en une oxydation à froid du carbone du sol avec du bichromate de potassium ($K_2Cr_20_7$) 1N en présence de H_2SO_4 concentré. L'excès du bichromate est dosé par du sel de Mohr $Fe(SO4)_2(NH)_2$ en présence d'indicateur coloré. La teneur en matière organique a été déterminée à partir de la teneur en carbone organique, en utilisant le coefficient multiplicateur de 1,724.

- **Détermination de l'azote**

La minéralisation de l'azote a été faite selon la méthode de Kjedhal reprise par Novozansky *et al.*, (1983). Il s'agit d'une attaque acide H_2SO_4 concentré en présence de catalyseur au sélénium et de H_2O_2, ce qui convertit l'azote organique en sulfate d'ammonium $(NH_4)_2SO_4$. L'ion (NH_4^+) ainsi formé est dosé par colorimétrie automatique au SKALAR, dont le principe est fondé sur la réaction modifiée de Berthelot : l'ammonium est chloré en chlorure d'ammonium qui réagit avec le salicylate pour former le 5-amminosalycilate. Après oxydation par couplage il se forme un complexe vert dont l'absorbance est mesurée à 660 nm.

- **Dosage du phosphore total**

Concernant la minéralisation du phosphore, elle est identique à celle de l'azote total. Le dosage est fait par colorimétrie automatique au SKALAR. Le molybdate d'ammonium et le potassium antimoine tartrate réagissent en milieu acide avec l'acide ascorbique en formant un complexe coloré en bleu en présence de P dont l'absorbance est mesurée à 880 nm. L'intensité de la coloration est proportionnelle à la quantité de P dans le milieu.

- **Dosage du potassium total**

La méthode de minéralisation est identique à celle décrite précédemment. Le potassium est dosé par un spectrophotomètre à émission de flamme Jencons selon la méthode proposée par Walinga *et al.* (1989).

- **Détermination du phosphore assimilable**

La méthode a été utilisée BRAY I (Bray et Kurtz, 1945) pour le dosage du phosphore assimilable. L'extraction a été effectuée à l'aide d'une solution mixte de fluorure d'ammonium (NH_4F) 0,03M et d'acide chlorhydrique (HCl) 0,025 M. Cette méthode permet l'extraction du phosphore acido-soluble et une grande partie du phosphore lié au calcium.

- **Détermination du potassium disponible**

L'extraction du potassium disponible a été effectuée à l'aide de la solution formée par l'acide chlorhydrique (0,1N) et l'acide oxalique ($H_2C_2O_4$) 0,4 N. Ensuite la détermination a été réalisée grâce au photomètre à flamme.

- **La granulométrie du sol**

L'analyse granulométrique en trois fractions a été réalisée selon la méthode internationale adaptée à la pipette de Robinson Khöln (Mathieu et Pieltain, 1998). Elle s'effectue sur la terre fine préalablement tamisée à 2 mm. Ensuite la matière organique est totalement détruite par l'eau oxygénée (H_2O_2) et l'argile est dispersée par l'hexamétaphosphate de sodium (HMP). On procède ensuite aux prélèvements des limons et argiles pour isoler les éléments non tamisables et à la séparation par tamisage des sables fins et grossiers respectivement à l'aide des tamis de 50 et 200 microns.

3.4. Analyses statistiques

Le logiciel Microsoft Office Excel 2010 a servi à la saisie des données ainsi qu'à la réalisation des graphiques. L'analyse de variance (ANOVA) a été réalisée avec le logiciel GenStat Discovery version 4. Le test de Student-Newman Keuls a servi à séparer les moyennes lorsque l'ANOVA révèle des différences significatives au seuil de 5%.
Le modèle agronomique DSSAT v4.5 a permis de faire les simulations pour l'évaluation des résultats de terrain.

3.5. Méthodologie d'application du modèle DSSAT

L'application du modèle DSSAT procède par des étapes essentielles. Il faut d'abord calibrer le modèle. Ce processus consiste à ajuster les paramètres du modèle de telle sorte que les résultats de simulation soient semblables aux résultats réels. Une fois que le modèle est calibré, on passe à la simulation qui permet l'obtention des résultats. Ensuite, suit l'étape d'évaluation du modèle qui consiste à vérifier si statistiquement les résultats de la simulation ressemblent aux résultats réels. Ainsi, les résultats de la simulation vont être comparés aux résultats observés. On termine par la validation du modèle qui est la confirmation des résultats antérieurs.

3.5.1. Calibration

La calibration 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. Cette calibration 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).
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 le 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. 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.

- **Climat** :

Les données climatiques journalières (la température maximum, la température minimum, la précipitation, l'insolation) sur 36 années (1977 à 2012) ont été collectées auprès de l'ASECNA au niveau des stations synoptiques de Fada puis intégrées dans le modèle. La durée d'insolation a été convertie en radiation solaire par le programme *Weatherman* de DSSAT.

Des équations intrinsèques du modèle lient ces données à la photosynthèse, aux différents stades de croissance, aux mouvements de l'eau du sol vers la plante, à l'accumulation de matière sèche. Ces équations permettent aux modèles de suivre l'évolution de la plante au cours d'une simulation.

- **Sol** :

Un profil a été décrit sur le site expérimental. Le sol est de type ferrugineux tropical lessivé induré profond. Les caractéristiques du profil du sol réalisé sont consignées sur le **Tableau V** ci-dessus.

- **Dispositif :**

Le dispositif expérimental sur le terrain a été décrit dans le modèle DSSAT (BFFA1201.MZX) conformément à la convention de nomination des fichiers du modèle (BF : Burkina Faso ; FA : Fada ; 12 = année 2012 et 01 pour essai numéro 1).

- **Variété** :

La variété de maïs utilisée a été calibrée en utilisant l'estimateur de coefficient génétique Glue qui est un utilitaire d'estimation des coefficients génétiques incorporé dans DSSAT (He *et al.*, 2010). 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 ajustées aux résultats de simulation. Ces paramètres appelés coefficients génétiques ont été utilisés pour simuler les conditions d'essais (climat, sol, année) et ont servi à l'évaluation du modèle.

Sur le plan agronomique, ces coefficients représentent la potentialité génétique intrinsèque du cultivar indépendamment des stress environnementaux. Ils définissent chaque variété par rapport à sa durée phénologique (P1 et P5), sa sensibilité à la photopériode (P2), au nombre maximal de grains par épi (G2), à la vitesse de remplissage des grains durant la phase linéaire de remplissage des grains (G5), au nombre maximal de feuilles par plant spécifiques (PHINT) (Dzotsi, 2002).

3.5.2. Simulation

Simulation signifie *imitation*. Il s'agit d'imiter le comportement de la variété dans les conditions réelles par l'ordinateur. L'essence de la simulation est en effet l'imitation de processus réels (Struif Bontkes, 1999). La simulation consiste à faire apparaître les états successifs d'un système grâce à un système mathématique de transformations de données (analytiques ou expérimentales) définissant l'état initial (Delforge, 1984).

Le modèle de simulation de la croissance et du développement des céréales utilisé est le programme DSSAT v4.5, notamment le module CERES-Maize.

3.5.3. Evaluation et Validation

Une fois calibré, le modèle dont on veut faire un usage plus général, doit être testé dans des conditions différentes de sol, de climat et de culture. Il s'agit de l'évaluation du modèle. Il est généralement accepté que le test ultime d'un modèle est la précision avec laquelle il décrit un système réel, ce qui implique la comparaison des prédictions du modèle avec les mesures réelles (Du Toit *et al.*, 2001; Jones et Kiniry, 1986).

Le terme 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.

Dans la présente étude, nous avons utilisé 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 testées. Il s'agit de la comparaison de valeurs basée sur la ligne 1:1 couplée avec le coefficient de corrélation R^2 (Singh et Wilkens, 2001), les écarts réels qui séparent les valeurs simulées à celles observées exprimés par l'erreur moyenne de prédiction RMSE (Du Toit *et al.*, 2001) et l'erreur moyenne normalisée de prédiction NRMSE (Loague et Green, 1991 ; Jamieson *et al.*, 1991). 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 prédicateur, 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. Dans la comparaison entre simulations et observations par exemple, une valeur de R = 0,80 c'est-à-dire = 0,64 indique que 64% des variations dans les valeurs empiriques (mesurées) sont expliquées par le modèle.

La ligne 1:1 n'est pas suffisante pour l'évaluation de la performance du modèle parce que les limites d'acceptabilité des prédictions ne peuvent être définies sans ambiguïté (Du Toit *et al.*, 2001) ; l'hypothèse de degré d'association linéaire peut être difficile à satisfaire (Mitchell, 1997). Une méthode alternative consiste à calculer et à évaluer les écarts réels qui séparent simulations et observations. Les valeurs positives de ces écarts signifient que le modèle a surestimé les valeurs alors que les valeurs négatives indiquent que le modèle a sous-estimé.

L'erreur moyenne de prédiction RMSE (Root Mean Squared Error) ou RMSD (Root Mean Squared Deviation) 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. Il est souvent positif et la valeur nulle est idéale. 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 NRMSE 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).

$$\text{RMSE} = [n^{-1} \sum_{i=n}^{n} (si - mi)^2]^{0,5}$$

$$\text{NRMSE} = \frac{\text{RMSE x 100}}{\text{Moyenne observée}}$$

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

3.5.4. Application du modèle DSSAT : l'analyse saisonnière

Le dispositif expérimental a été décrit dans le modèle DSSAT afin de déterminer sur une période allant de 1977 à 2012 (36 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 36 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 engrais et de leur application) et des prix de vente du maïs (**Tableau VI**). Le prix de vente du maïs considéré dans le modèle 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, 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, despathages, 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 VI : Prix de vente et coûts de production de maïs dans la zone d'étude

Prix de vente du maïs	
Coût des intrants (F CFA/kg)	180
Semences (F CFA/kg)	600
Valeurs de N (F CFA/kg)	543
Valeurs de P (F CFA/kg)	587
Valeurs de K (F CFA/kg)	1250
Amendements organiques (F CFA/kg)	20
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)	20000

CHAPITRE 3 : RESULTATS ET DISCUSSIONS

I. Effets des facteurs étudiés sur les rendements du maïs

1.1. Résultats

1.1.1. Effet de la densité de semis sur les rendements du maïs

Les données consignées dans le **Tableau VII** indiquent que le poids de 1000 grains du maïs dans les parcelles de densités D1 (densité vulgarisée) et D2 est de 5 % plus élevé que celui de la parcelle de densité D3. En effet, l'analyse statistique révèle que ces deux densités de semis ont un effet très hautement significatif sur le poids 1000 grains. Par contre, le rendement grain et le rendement paille sont statistiquement équivalents au niveau des trois densités de semis.

Tableau VII : Effet de la densité de semis sur le poids de 1000 grains et les rendements du maïs

Traitements	Poids 1000 grains (g)	Rendement grain (kg/ha)	Rendement paille (kg/ha)
D1 (80cm*40 cm)	168[a]	2070	3066
D2 (70cm*40 cm)	167[a]	2149	3019
D3 (60cm*40 cm)	159[b]	2058	3068
Probabilité	<,001	0,786	0,960
Signification	THS	NS	NS

THS: Très Hautement Significatif ; NS : Non Significatif.

NB: Les moyennes d'une même colonne suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de 5 %.

1.1.2. Effet de la fumure organique sur les rendements du maïs

Les résultats de l'effet de la fumure organique sur les rendements grain et paille sont donnés dans le **tableau VIII.** Le poids moyen de 1000 grains des parcelles fumées est plus élevé d'environ 9 % par rapport à celui des parcelles non fumées. Les rendements moyens en grain des parcelles fumées sont significativement supérieurs de 43 % que ceux des parcelles non fumées. Les rendements moyens paille des parcelles fumées sont de 52 % plus élevés que ceux des parcelles non fumées. L'analyse statistique révèle qu'il existe une différence très hautement significative entre les traitements.

Tableau VIII : Effet de la matière organique sur le poids de 1000 grains et les rendements du maïs

Traitements	Poids 1000 grains (g)	Rendement grain (kg/ha)	Rendement paille (kg/ha)
MO (2,5t/ha)	171[a]	2467[a]	3686[a]
Sans MO	157[b]	1719[b]	2416[b]
Probabilité	<,001	<,001	<,001
Signification	THS	THS	THS

MO : matière organique ; **SMO** : Sans matière organique ; **THS**: Très Hautement Significatif.

NB: Les moyennes d'une même colonne suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de 5 %.

1.1.3. Effets des formules d'engrais sur les rendements du maïs

Les résultats consignés dans le **Tableau IX** indiquent que les poids de 1000 grains des formules d'engrais F3, F4 et F2 forment un groupe homogène et diffèrent significativement de celui du témoin. Le poids moyen de 1000 grains des parcelles ayant reçu les formules d'engrais F3 (74N-20P-23K) est de 11 % plus élevé suivi de celui de F4 (96N-30P) avec 8 % puis de 5 % pour F2 (75,5N-20P) par rapport à F1 (témoin). Le témoin F1 a entraîné le plus faible poids moyen de 1000 grains. La fertilisation minérale F3 (74N-20P-23K) donne le meilleur poids moyen de 1000 grains.

Les résultats sur les rendements moyens grains et paille montrent que les formules d'engrais F2, F3 et F4 forment un groupe homogène et diffèrent significativement du témoin. L'application des différentes formules d'engrais a entraîné une augmentation des rendements grains de 64 % pour F2, 93 % pour F3 et de 87 % pour F4 par rapport au témoin F1. Quant au rendement paille, un accroissement de 61 % est observé pour la formule F2, de 67 % pour F3 et de 80 % pour F4 comparativement au témoin F1.

En effet, l'ANOVA met en évidence une différence très hautement significative entre les formules d'engrais sur les trois paramètres de rendements.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Tableau IX : Effets des formules d'engrais sur le poids de 1000 grains et les rendements du maïs

Traitements	Poids 1000 grains (g)	Rendement grain (kg/ha)	Rendement paille (kg/ha)
F1 (Témoin)	155[c]	1300[b]	2006[b]
F2 (75,5N-20P)	163[ab]	2127[a]	3237[a]
F3 (74N-20P-23K)	172[a]	2511[a]	3353[a]
F4 (96N-30P)	168[ab]	2433[a]	3609[a]
Probabilité	<,001	<,001	<,001
Signification	THS	THS	THS

THS: Très Hautement Significatif.
NB : Les moyennes d'une même colonne suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de 5 %.

1.2. Discussion

La variation des densités de semis n'a aucun effet significatif sur les rendements grains et paille. Cependant, elle a un effet significatif sur le poids 1000 grains du maïs. En effet, les écartements 80 cm*40 cm et 70 cm*40 cm induisent une augmentation du poids moyen de 1000 grains tandis qu'une augmentation de la densité de semis (60 cm*40 cm) entraîne une baisse du poids moyen de 1000 grains. L'augmentation du poids grain aux écartements 80 cm*40 cm et 70 cm*40 cm pourrait être due à la réduction de la compétition entre les plantes pour l'eau, la lumière et surtout pour les éléments nutritifs qui s'avèrent nécessaires au bon remplissage des grains (Thibault, 2001). Sur un sol de faible niveau de fertilité, une augmentation de la population des plants induit une réduction de rendements.

L'apport de la fumure organique a induit une augmentation significative des rendements du maïs. Cela est dû au fait que la matière organique améliore les propriétés physiques du sol et constitue une source d'éléments nutritifs pour les cultures. Aussi, elle permet le stockage d'éléments nutritifs nécessaires à la croissance des plantes, augmente la capacité d'échange cationique (C.E.C), améliore la stabilité des agrégats et les activités microbiennes et enzymatiques ainsi que la capacité de rétention en eau du sol. Elle joue alors un double rôle dans la nutrition des plantes : fournisseurs d'éléments minéraux pour la nutrition des plantes, elle améliore aussi l'efficacité de la fumure minérale. Les matières organiques permettent donc le recyclage des éléments nutritifs et la régulation de la nutrition des plantes. Ce qui est confirmé par les résultats de nombreux travaux (Sedogo, 1981 et 1993 ; Piéri, 1989 ; Ouédraogo et *al.*, 2001 et 2007).

L'application des différentes formules d'engrais a induit un effet très hautement significatif sur le poids 1000 grain, les rendements grain et paille comparativement au témoin. La formule F3 dosant 74N, 20P, et 23K donne les meilleurs rendements (poids moyen de 1000 grains et rendements grains). Cela est peut-être dû que l'application de cette formule permet non seulement de corriger la carence du sol en N, P et K mais également de favoriser une bonne croissance des plants. La présence du potassium dans cette formule pourrait éventuellement jouer un rôle important dans le remplissage des grains. En effet, les travaux de nombreux auteurs ont démontré l'importance de ces éléments nutritifs dans l'amélioration des rendements des cultures (Bationo *et al,* 1991 ; et Bado *et al.*, 1997).

En présence de fertilisation minérale, une hausse des rendements grains et paille est observée. Cela est dû au fait que la fumure minérale apporte les éléments nutritifs majeurs (N, P et K) nécessaires aux plantes. En effet, l'azote, le phosphore et le potassium constituent les principaux facteurs de croissance des plantes. Ils favorisent l'augmentation de la densité foliaire des couverts végétaux (Falisse et Lambert 1994 ; Rabat, 2003 et Lompo, 2009) et donc améliorent les rendements des cultures.

II. Effet combiné des facteurs étudiés sur les rendements du maïs

2.1. Résultats

2.1.1. Effet combiné de la densité de semis et de la matière organique sur les rendements

L'ANOVA montre que le facteur densité de semis combiné au facteur matière organique n'a aucun effet significatif sur le poids 1000 grains et le rendement grains du maïs. Cependant, il révèle une différence significative sur le rendement paille (**Tableau X**). Pour ce qui est des rendements paille, deux groupes de traitements se distinguent : densité de semis en présence de matière organique et densité de semis en absence de matière organique. Il ressort que pour toutes les densités de semis, les rendements paille sont plus élevés de 40 à 50 % en présence de matière organique par rapport à ceux des parcelles non fumées.

Tableau X : Effet combiné de la densité de semis et de la matière organique sur le poids de 1000 grains et les rendements du maïs

Interaction densité de semis*matière organique	Poids 1000 grains (g)	Rendement grain (kg/ha)	Rendement paille (kg/ha)
D1 MO	174	2402	3867[a]
D2 MO	174	2660	3776[a]
D3 MO	166	2337	3415[a]
D1 SMO	161	1738	2262[b]
D2 SMO	159	1638	2266[b]
D3 SMO	152	1779	2722[b]
Probabilité	0,775	0,236	0,046
Signification	NS	NS	S

MO : matière organique ; **SMO** : Sans matière organique ; **D1**: densité 80 cm*40 cm ; **D2**: densité 70cm*40cm ; **D3** : 60 cm*40 cm ; **S:** Significatif ; **NS** : Non significatif.
NB: Les moyennes d'une même colonne suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de 5 %.

2.1.2. Effet combiné de la densité de semis à la Formule d'engrais sur les rendements

L'ANOVA révèle une interaction significative entre la densité de semis et la formule d'engrais sur le poids 1000 grains (**Tableau XI**). Deux groupes de traitements (a et b) se distinguent en ce qui concerne le poids de 1000 grains. Le traitement D3F1 (Témoin à la densité de semis 60 cm*40 cm) présente le plus faible poids moyen de 1000 grains. Par contre, cette interaction n'est pas significative pour les rendements grain et paille.

Tableau XI : Effet combiné de la densité de semis à la formule d'engrais sur le poids de 1000 grains et les rendements grains et pailles du maïs

Densité de semis et Dose d'engrais	Poids 1000 grains (g)	Rendement grain (kg/ha)	Rendement paille (kg /ha)
D1 F3	175[a]	1406	2148
D2 F4	174[a]	1953	3164
D2 F3	171[a]	2656	3476
D3 F3	170[a]	2266	3476
D1 F4	168[a]	1488	2083
D1 F2	166[a]	2120	3199
D2 F2	162[a]	2470	3259
D3 F2	161[a]	2517	3534
D3 F4	161[a]	1004	1786
D2 F1	161[a]	1835	3348
D1 F1	161[a]	1946	3323
D3 F1	143[b]	2058	3817
Probabilité	0,047	0,399	0,888
Signification	S	NS	NS

D1: densité 80 cm*40 cm ; **D2**: densité 70cm*40cm ; **D3** : 60 cm*40 cm ; **F1** : Témoin ; **F2** : 75,5N-20P ; **F3** : 74N-20P-23K ; **F4** : 96N-30P ; **S** : Significatif ; **NS** : Non significatif.
NB: Les moyennes d'une même colonne suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de 5 %

2.1.3. Effet combiné de la matière organique et les formules d'engrais

Aucune différence significative n'est observée pour les rendements grains et paille. Par contre, l'interaction entre la matière organique et les formules d'engrais présente une différence significative pour le poids 1000 grains **(Tableau XII)**. Cinq groupes de traitements se dégagent. La fertilisation F3 (74N-20P-23K) combinée à la matière organique présente le meilleur poids moyen de 1000 grains. Cependant, le témoin F1 (sans fertilisation minérale) en absence de matière organique donne le plus faible poids de 1000 grains. Le traitement MOF4 et MOF2 ainsi que SMOF4 appartiennent au même groupe de traitements.

Tableau XII : Effet combiné de la matière organique à la formule d'engrais sur le poids de 1000 grains et les rendements grains et paille du maïs

Matière organique et Dose d'engrais	Poids 1000 grains (g)	Rendement grain (kg/ha)	Rendement paille (kg/ha)
MO F1	163[bc]	1564	2473
MO F2	170[b]	2418	4088
MO F3	183[a]	3075	3935
MO F4	170[b]	2809	4248
SMO F1	146[d]	1035	1539
SMO F2	156[c]	1835	2386
SMO F3	161[bc]	1946	2771
SMO F4	166[b]	2058	2970
Probabilité	0,010	0,256	0,398
Signification	S	NS	NS

MO : matière organique ; **SMO** : Sans matière organique **F1** : Témoin ; **F2** : 75,5N-20P ; **F3** : 74N-20P-23K ; **F4** : 96N-30P ; **S** : Significatif ; **NS** : Non significatif.
NB: Les moyennes d'une même colonne suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de 5 %.

2.1.4. Effet combiné de la densité de semis et de la fertilisation organo-minérale

L'interaction matière organique*densité de semis*formule d'engrais est hautement significative pour le poids moyen de 1000 grains (**Tableaux XIII**). Cette interaction d'ordre 2 est la résultante des interactions simples d'ordre 1 entre densité*fertilisation minérale et entre matière organique*fertilisation minérale pour la même variable poids de 1000 grains. Une analyse factorielle permet de mettre en évidence 9 groupes de traitements. Les traitements D3MOF3 et D1MOF3 ont le poids moyen de 1000 grains le plus élevé suivis de D2MOF3. L'ANOVA ne révèle aucune différence significative de l'interaction des trois facteurs étudiés sur les rendements grains et paille du maïs (**Tableau XIV**). Néanmoins, les résultats présentés sur la **Figure 7** montrent que la fertilisation (F3+MO) à la densité de semis D2 induit un rendement grain (3274 kg/ha) par rapport aux autres traitements. Pour la paille, la **figure 8** indique par contre que c'est le traitement D1MOF2 qui donne le meilleur rendement paille (4360 kg/ha).

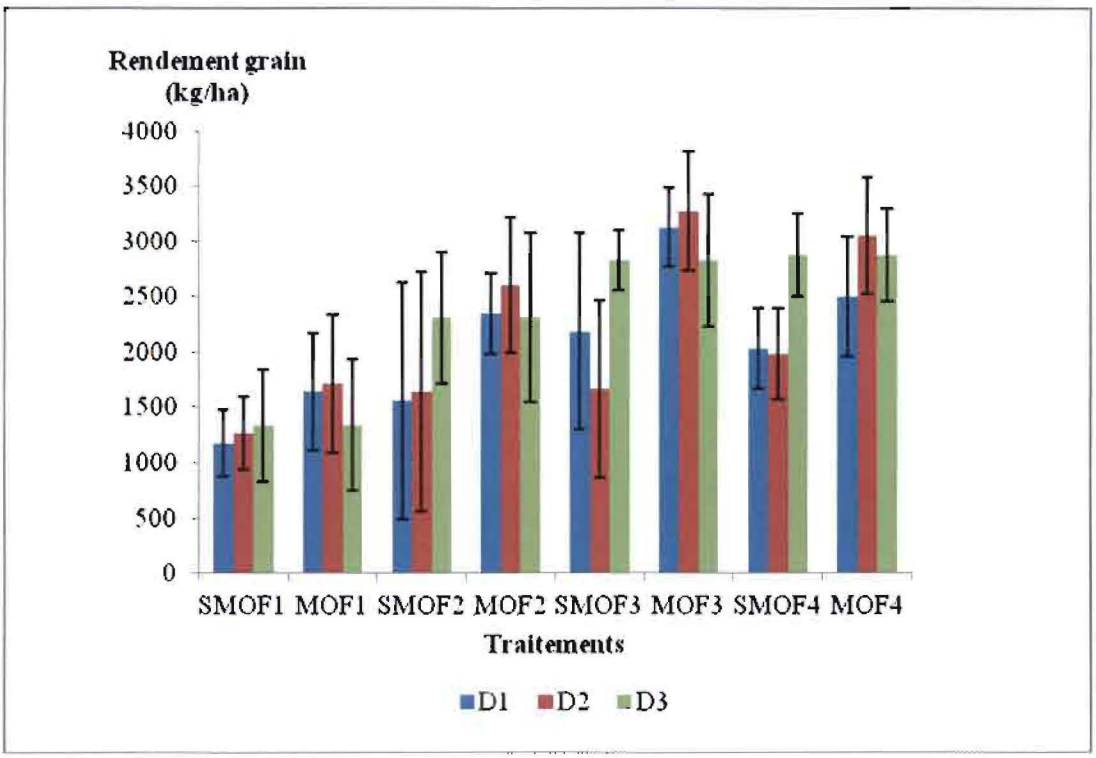

Figure 7 : Comparaison des rendements grains dus aux trois facteurs combinés

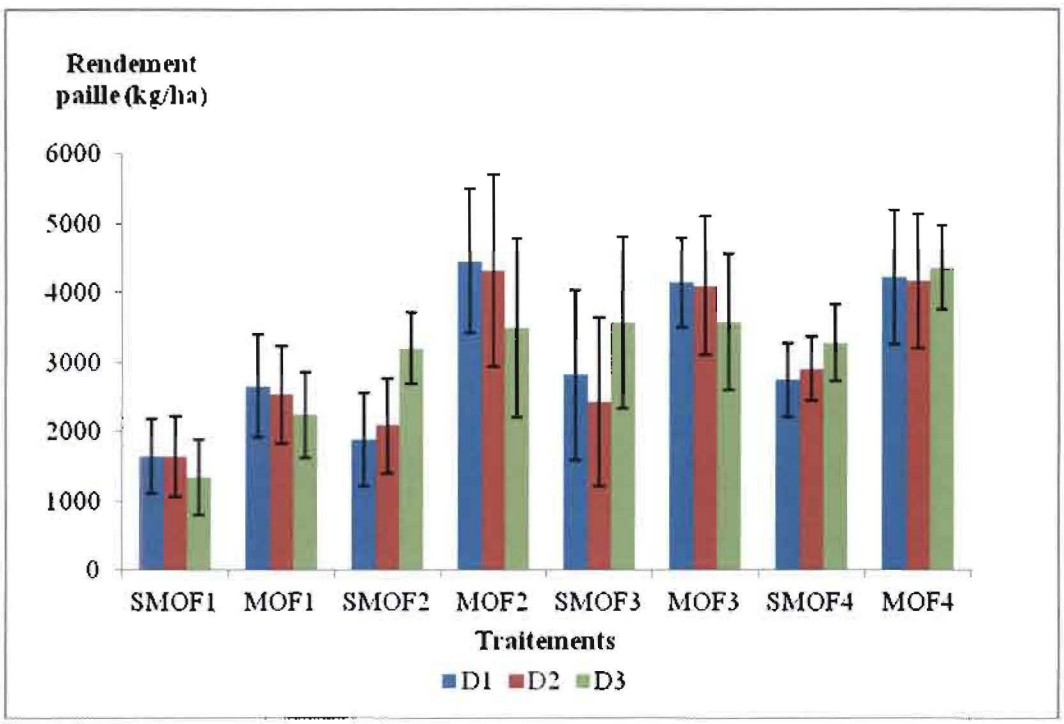

Figure 8 : Comparaison des rendements paille dus aux trois facteurs combinés

D1: densité 80 cm*40 cm , D2: densité 70cm*40cm ; D3 : 60 cm*40 cm ; MO matière organique ; SMO : Sans matière organique ; F1 : Témoin ; F2 75,5N-20P ; F3 : 74N-20P-23K ; F4 96N-30P.

N.B : Les barres sur les histogrammes représentent les écart-types entre les moyennes des rendements.

Tableau XIII : Effet combiné des trois facteurs étudiés sur le poids de 1000 grains du maïs

Traitements	Poids 1000 grains (g)	G1	G2	G3	G4	G5
D3 MO F3	183	a				
D1 MO F3	183	a				
D2 MO F3	181	a	b			
D1 MO F4	176	a	b	c		
D2 SMO F4	175	a	b	c		
D1MOF2	175	a	b	c		
D2 MO F4	173	a	b	c	d	
D2 MO F1	172	a	b	c	d	
D2 MO F2	172	a	b	c	d	
D1 SMO F3	166	a	b	c	d	e
D3 MO F2	163	a	b	c	d	e
D3 SMO F4	162	a	b	c	d	e
D1 SMO F4	161		b	c	d	e
D2 SMO F3	161		b	c	d	e
D1 SMO F1	161		b	c	d	e
D1 MO F1	160		b	c	d	e
D3 MO F4	160		b	c	d	e
D3 SMO F2	159		b	c	d	e
D1 SMO F2	158			c	d	e
D3 SMO F3	157			c	d	e
D3 MO F1	156			c	d	e
D2 SMO F2	151				d	e
D2 SMO F1	149					e
D3 SMO F1	130					e

G : Groupe
D1: densité 80 cm*40 cm ; **D2**: densité 70cm*40cm ; **D3** : 60 cm*40 cm ; **MO** : matière organique ; **SMO** : Sans matière organique ; **F1** : Témoin ; **F2** : 75,5N-20P ; **F3** : 74N-20P-23K ; **F4** : 96N-30P ; **S :** Significatif ; **NS** : Non significatif.
NB: Les moyennes d'une même colonne suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de 5 %.

Tableau XIV : Synthèse de l'ANOVA des effets des principaux facteurs sur le poids de 1000 grains et les rendements du maïs

		Poids 1000 grains (g)			Rendement grains (kg/ha)			Rendement paille (kg/ha)		
Facteurs	ddl	Valeur de F	Probabilité	Signification	Valeur de F	Probabilité	Signification	Valeur de F	Probabilité	Signification
DS*MO*FEng	6	3,29	0,007	HS	0,64	0,701	NS	0,98	0,447	NS

DS : densité de semis ; **MO** : Matière organique ; **FEng** : Formule d'Engrais ; **ddl** : Degré de liberté ; **HS**: Hautement Significatif ($p < 001$) ; **S** : Significatif , **NS** : Non Significatif ; **ANOVA**: Analyse de variance.

2.2. Discussion

En présence ou en absence de matière organique, les différentes densités de semis appliquées n'affectent ni le rendement grains ni le rendement paille. La combinaison entre les facteurs densité de semis et matière organique n'induit aucun effet significatif sur les deux paramètres estimés. Ces résultats qui sont contradictoires aux précédentes études de Thibault (2001) qui montrent que la réduction des écartements entre les lignes se traduit par une augmentation du nombre de lignes donc une augmentation de rendement. Cela peut être dû à un stress d'azote, de phosphore et de potassium soit à la période de floraison, soit au moment du remplissage des grains ou à la maturité. Par contre, l'analyse comparative entre la production avec et sans apport de matière organique révèle une augmentation significative des rendements paille pour les trois densités en cas d'apport de matière organique. La matière organique constitue un facteur essentiel à l'amélioration des propriétés physico-chimiques du sol, une bonne nutrition des plantes et pour un bon développement végétatif. Ce qui induit une augmentation de la production de la paille. Ceci suggère que l'apport au sol de matière organique a permis de satisfaire les besoins des plantes pour un bon développement de la biomasse végétale, mais que sa qualité, en particulier sa déficience en N, P et K influe négativement sur le remplissage des grains (Bationo *et al,* 1991 ; et Bado *et al.*, 1997).

La combinaison des différents types de densités de semis et des formules d'engrais affecte le poids de 1000 grains. L'écartement 60 cm*40 cm entraîne une réduction du poids moyen de 1000 grains en cas d'absence de fumure minérale. Le faible poids moyen de 1000 grains enregistré pour le traitement à forte densité sans apport d'engrais, peut s'expliquer par le fait que les densités élevées de plants entraînent une augmentation de la concurrence entre les plants de maïs pour l'humidité, la lumière et les éléments nutritifs. Lorsque ces ressources vitales sont limitées, la concurrence entre les plants diminue le rendement individuel de chaque plant (Thibault, 2001). En absence de fumure minérale, une forte densité de semis réduit le poids de moyen de 1000 grains.

Cette combinaison des densités de semis avec des formules d'engrais n'a pas affecté les rendements grains et paille. En effet, toute augmentation du poids d'un grain devrait nécessairement entraîner une augmentation de rendement en grain. Toutefois, ce résultat dépend du nombre de grains par épis, du nombre d'épis par plant et du nombre de plants/m^2.

La fertilisation organo-minérale a un effet significatif sur l'augmentation du poids 1000 grains. La formule d'engrais F3 (74N-20P-23K) combinée à la matière organique qui induit le

meilleur poids 1000 grains laisse entrevoir qu'en présence de matière organique, le potassium constitue l'élément déterminant du rendement. Avec et sans matière organique la formule d'engrais F4 (96N-30P) qui donne des résultats identiques montre qu'une augmentation d'azote et de phosphore ne compense pas la carence potassique. Seule l'action combinée de ces trois éléments permet une augmentation des rendements. Il est évident que cette fertilisation organo-minérale augmente les rendements puisqu'elle contient en plus de l'azote, du phosphore et le potassium qui joue un rôle important dans le remplissage des grains. Ce résultat s'inscrit en droite ligne de ceux issus des essais longue durée de Saria au Burkina Faso et de Sadoré au Niger (Bationo *et al.,* 2012). Aucune différence significative n'est observée pour les rendements grains et paille.

Les résultats de la combinaison densité de semis*fertilisation organo-minérale montrent une variation du poids moyen de 1000 grains. Au regard de ces résultats observés sur l'effet combiné des 3 facteurs, il ressort que la densité de semis vulgarisé (80 cm*40 cm) et celle 60 cm*40 cm combinées à la fertilisation organo-minérale (MOF3) augmentent significativement le poids moyen de 1000 grains suivie de la densité 70 cm*40 cm. L'écartement 80 cm*40 cm entraîne une réduction de la compétition pour les éléments nutritifs d'où une absorption efficiente et efficace de ces derniers par les plantes avec pour conséquence un bon remplissage des grains. Cela se traduit par une augmentation du poids de 1000 grains. Avec un apport organo-minérale, l'augmentation de la densité de semis (60 cm*40 cm) a induit une augmentation du poids de 1000 grains identique à celle de la densité vulgarisée. Cela signifie que la densité de semis efficace est fonction du niveau de fertilité du sol. Toute densité de semis peut augmenter le poids moyen 1000 grains mais à une fertilisation organo-minérale judicieuse comme MOF3. Ces résultats sont conformes à certaines études qui ont démontré l'augmentation de rendement avec l'accroissement de la densité de population (Cox, 1996). Aussi, les résultats de Bagayoko (2012) montrent que l'élévation de la densité de semis peut augmenter les rendements à condition que la fertilisation organo-minérale soit suffisante et équilibrée.

Cependant, la combinaison des trois facteurs n'a pas d'effet significatif sur les rendements grains et paille. Ce résultat peut être dû aux stress d'éléments nutritifs à des périodes critiques de développement et de croissance.

III. Evaluation de la performance du modèle DSSAT sur la simulation de la croissance et du développement du maïs

3.1. Résultats

3.1.1. 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 XV**.

Tableau XV : Coefficients génétiques calculés pour la variété Barka à l'aide du programme GLUE

Coefficient	P1	P2	P5	G2	G3	Phint
Valeurs	180,00	0,600	700,00	600,00	7,20	37,00

- 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.

Suivant les normes des valeurs de coefficients génétiques du maïs, 5<**P1**<450 ; 0<**P2**<2 ; 580<**P5**<999 ; 248<**G2**<990 ; 5<**G3**<16,5 et **Phint**<49. Ce qui montre que notre variété Barka a été très bien calibrée.

3.1.2. Rendement grain

Le Tableau **XVI** et la Figure **9** présentent la comparaison entre les rendements grains observés et ceux simulés par DSSAT. De ces résultats, il ressort que la différence moyenne entre les valeurs simulées et observées est positive (146) et le ratio est de 1. Aussi, la majorité des points (72 %) sont en dessous de la ligne 1 :1. Ce qui signifie que les rendements grains simulés ont donc été surestimés par le modèle DSSAT. La valeur du coefficient de détermination R^2 est élevée (74%, donc supérieure à 0,50). Malgré le degré de surestimation du rendement grain, il existe donc une forte corrélation entre simulations et mesures. L'erreur moyenne de prédiction RMSE est de 310. L'erreur moyenne normalisée de prédiction NRMSE entre les rendements observés et simulés est égal à 13%. La performance du modèle est alors bonne (Jamieson *et al.*, 1991).

Tableau XVI : Comparaison entre les valeurs mesurées et simulées du rendement grain

	Rendement grains (kg/ha)	
	Observé	**Simulé**
D1MOT2	2344	2593
D1MOT3	3125	2841
D1MOT4	2500	2807
D1SMOT2	1562	1879
D1SMOT3	2187	2173
D1SMOT4	2031	2212
D2MOT2	2604	2665
D2MOT3	3274	2880
D2MOT4	3051	2877
D2SMOT2	1637	1971
D2SMOT3	1667	2338
D2SMOT4	1984	2351
D3MOT2	2306	2629
D3MOT3	2827	2924
D3MOT4	2877	2911
D3SMOT2	2306	2080
D3SMOT3	1984	2453
D3SMOT4	2158	2464
Moyenne	2357	2503
Différence moyenne	146	
Ratio	1	
RMSE	310	
NRMSE	13%	
R^2	74%	

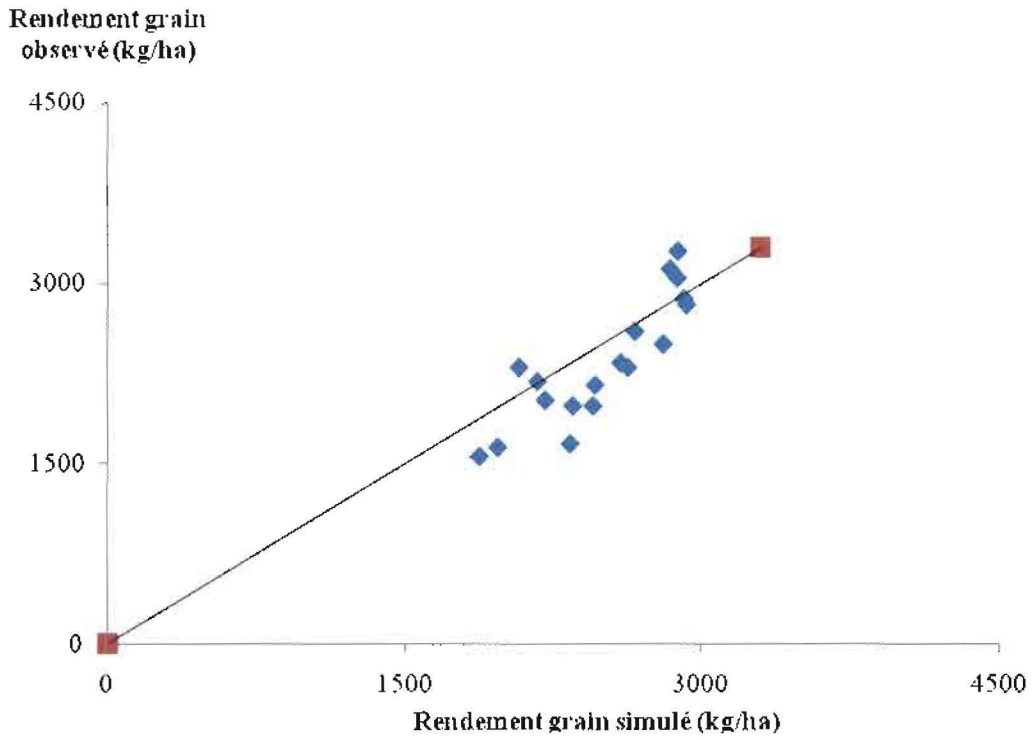

Figure 9: Représentation dispersée du rendement grain simulé en fonction du rendement grain observé.

3.1.3. Rendement paille

Les résultats de la comparaison des moyennes entre les rendements paille observés et ceux simulés par DSSAT (**tableau XVII** et **figure 10**) montrent que la différence moyenne entre les valeurs simulées et observées est positive et élevée (1396). La quasi-totalité des points sont en dessous de la ligne 1 :1. Ce qui signifie que les rendements grains simulés ont donc été surestimés par le modèle DSSAT. La valeur du coefficient de détermination R^2 est élevée (72%, donc supérieure à 0,50). Malgré le degré de surestimation du rendement grain, il existe donc une forte corrélation entre simulations et mesures. L'erreur moyenne de prédiction RMSE est de 1498. L'erreur moyenne normalisée de prédiction NRMSE entre les rendements observés et simulés est égal à 43%. La performance du modèle n'est pas bonne selon Jamieson *et al.* (1991).

Tableau XVII : Comparaison entre les valeurs mesurées et simulées du rendement paille

	Rendement paille (kg/ha)	
	Observé	**Simulé**
D1MOF2	4453	5048
D1MOF3	4141	5720
D1MOF4	4219	5747
D1SMOF2	1875	3178
D1SMOF3	2812	3738
D1SMOF4	2734	3874
D2MOF2	4315	5294
D2MOF3	4092	6049
D2MOF4	4167	6092
D2SMOF2	2083	3383
D2SMOF3	2426	4136
D2SMOF4	2902	4249
D1MOF2	3497	5356
D1MOF3	3571	6234
D1MOF4	4360	6260
D1SMOF2	3199	3551
D1SMOF3	3571	4404
D1SMOF4	3274	4500
Moyenne	3427	4823
Différence moyenne	1396	
Ratio	1	
RMSE	1498	
NRMSE	43%	
R^2	72%	

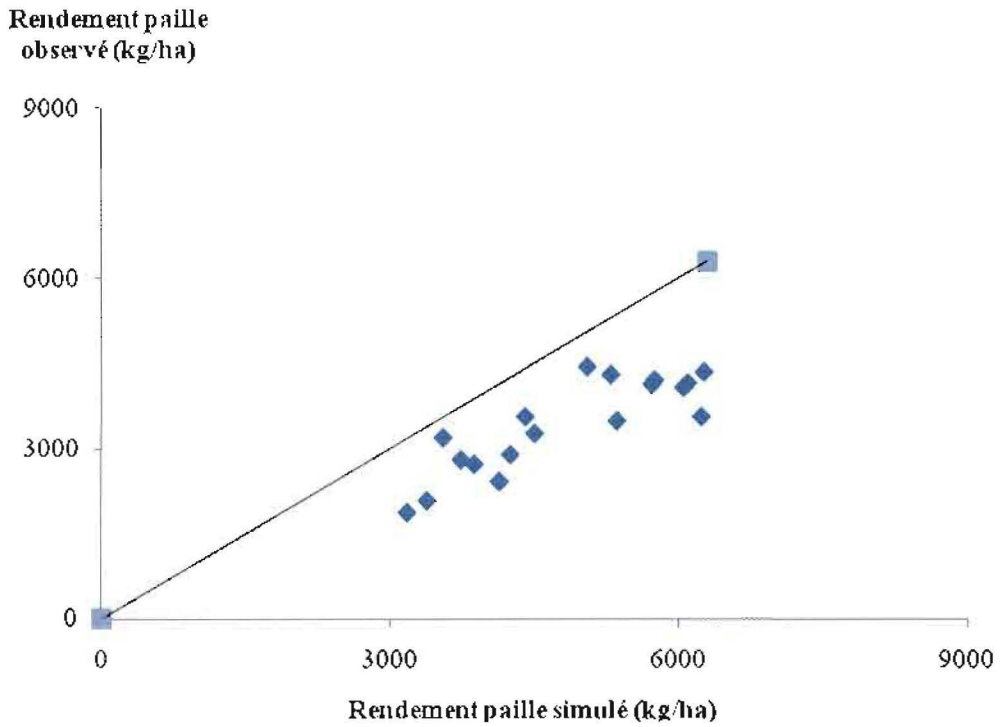

Figure 10 : Représentation dispersée du rendement paille simulée en fonction du rendement paille observée.

3.1.4. Biomasse totale

Le **Tableau XVIII** et la **Figure 11** présentent la comparaison entre la biomasse totale observée et simulée de l'essai. Il ressort de l'analyse des résultats de ce tableau et de cette figure que la majorité des points sont en dessous et proches de la ligne 1:1. La différence moyenne est positive et élevée (1535) et la valeur du coefficient de détermination R^2 qui est de 81 % est élevée (supérieure à 50 %). Malgré la surestimation de la biomasse totale par le modèle, la valeur de R^2 montre qu'il existe donc une forte corrélation entre les simulations et les mesures. L'erreur moyenne de prédiction RMSE est de 1642. L'erreur moyenne normalisée de prédiction NRMSE entre les rendements observés et simulés est égal à 28%. La performance du modèle est jugée acceptable (Jamieson *et al.*, 1991).

Tableau XVIII : Comparaison entre les valeurs mesurées et simulées de la biomasse totale

	Biomasse totale (kg/ha)	
	Observé	**Simulé**
D1MOF2	6797	7603
D1MOF3	7266	8521
D1MOF4	6719	8514
D1SMOF2	3437	5038
D1SMOF3	5000	5891
D1SMOF4	4766	6065
D2MOF2	6920	7917
D2MOF3	7366	8882
D2MOF4	7217	8922
D2SMOF2	3720	5332
D2SMOF3	4092	6450
D2SMOF4	4886	6576
D1MOF2	5803	7940
D1MOF3	6399	9109
D1MOF4	7237	9121
D1SMOF2	5506	5606
D1SMOF3	5059	6830
D1SMOF4	5431	6936
Moyenne	5757	7292
Différence moyenne	1535	
Ratio	1	
RMSE	1642	
NRMSE	28%	
R^2	81%	

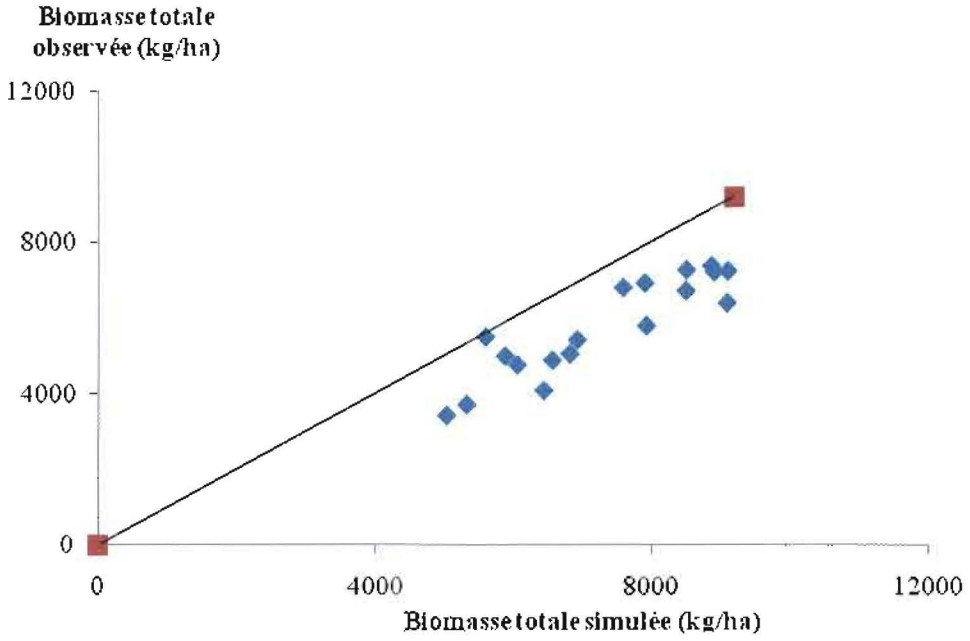

Figure 11: Représentation dispersée de la biomasse totale simulée en fonction de la biomasse totale observée.

3.2. Application du modèle DSSAT à l'évaluation pluriannuelle du rendement grain de maïs

Dans l'objectif d'analyser le comportement des différents traitements dans un environnement climatique changeant d'une année à l'autre, une analyse saisonnière du programme DSSAT a été utilisée. A cet effet, des simulations ont été étendues sur 36 ans en utilisant les données climatiques de Fada de 1977 à 2012. La figure 12 présente les résultats de l'analyse biophysique des rendements grains du maïs en fonction des traitements sur la période de 1977-2012. Il ressort que ces rendements sont fonctions de la densité de semis combinée à la fertilisation organo-minérale d'une année à l'autre. En effet, les traitements 1,5, 9, 13 17 et 21 présentent de faibles variabilités car les boîtes à moustache sont moins étalées mais présentent de faibles rendements grains. Des autres traitements présentant de faibles variabilités, les traitements 15 (D2MOF3) et 16 (D2MOF4) enregistrent de meilleurs rendements. Il en découle que le traitement D2MOF3 présente la plus faible variabilité et le rendement grains le plus élevé (**Figure 12**).

L'analyse financière relative au revenu monétaire du maïs par hectare avec l'efficience des différentes densités de semis combinées avec la fertilisation organo-minérale durant la période de 1977 à 2012 est présentée sur le **tableau XIX**. L'analyse stratégique et financière qui

nécessite pour son utilisation les données économiques est la deuxième composante de l'analyse saisonnière. Cette analyse traite les revenus monétaires des rendements induits par les traitements. Elle aboutit au choix du meilleur traitement efficient à l'aide du coefficient de la moyenne de Gini. Cette analyse financière est faite par introduction dans le modèle des coûts de production (coûts des engrais et de leur application) et des prix de vente du maïs (**Tableau VI**). Les résultats de cette analyse indiquent que le traitement 20 (D3MOF4) présente le meilleur revenu monétaire par hectare est la plus efficiente.

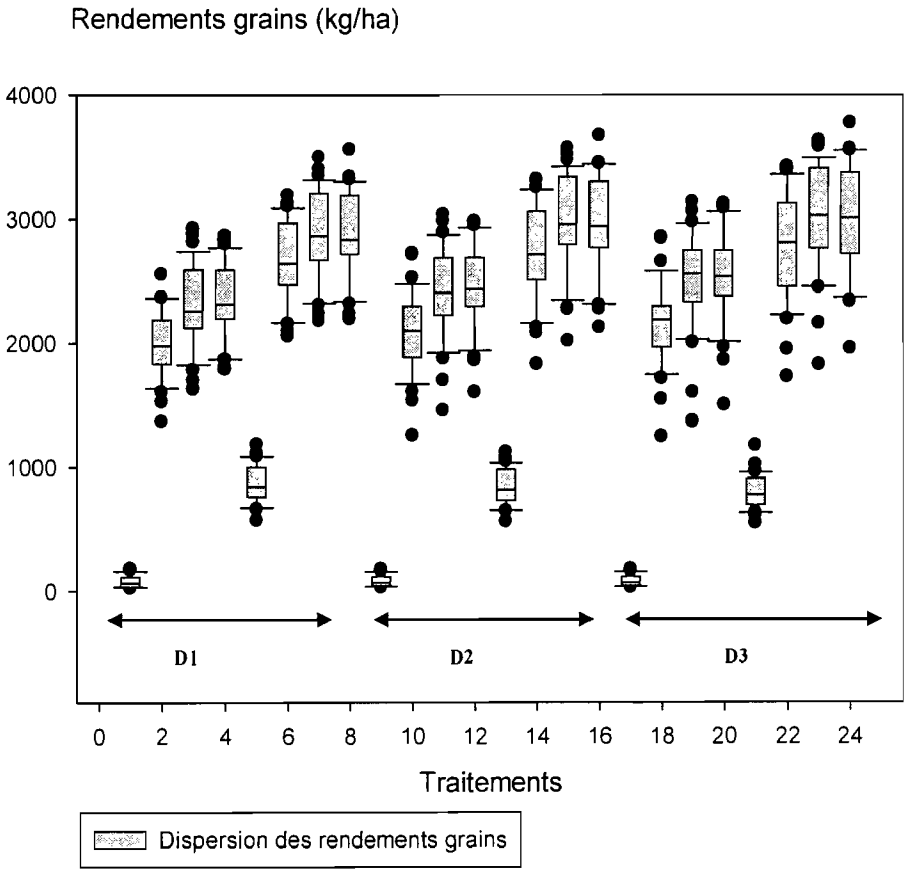

Figure 12: Représentation de la variabilité du rendement grain en fonction des traitements sur une période de 36 ans.

Numéros correspondants aux traitements respectifs sur la figure

1: D1SMOF1 ; 2: D1SMOF2 ; 3: D1SMOF3 ; 4: D1SMOF4 ; 5: D1MOF1; 6: D1MOF2; 7: D1MOF3 ; 8: D1MOF4 ; 9: D2SMOF1; 10: D2SMOF2 ; 11: D2SMOF3 ; 12: D2SMOF4 ; 13: D2MOF1 ; 14: D2MOF2 ; 15: D2MOF3 ; 16: D2MOF4 ; 17: D3SMOF1 ; 18: D3SMOF2 ; 19: D3SMOF3 ; 20: D3SMOF4 ; 21: D3MOF1; 22: D3MOF2 ; 23 : D3MOF3 ; 24: D3MOF4.

Tableau XIX : Analyse financière des différents traitements sur 36 ans

N° traitements	Traitements	E(x)	E(x) - F(x)	Efficient
1	D1MOF1	167745	152351	No
2	D1MOF2	340696	307741	No
3	D1MOF3	332438	294937	No
4	D1MOF4	363988	328772	No
5	D1SMOF1	73310	68612	No
6	D1SMOF2	272106	245336	No
7	D1SMOF3	278558	244639	No
8	D1SMOF4	318638	288736	No
9	D2MOF1	161400	146664	No
10	D2MOF2	349766	310462	No
11	D2MOF3	347428	307509	No
12	D2MOF4	377158	337054	No
13	D2SMOF1	73460	69093	No
14	D2SMOF2	285931	253987	No
15	D2SMOF3	298958	263850	No
16	D2SMOF4	337253	303510	No
17	D3MOF1	153020	139202	No
18	D3MOF2	360891	317371	No
19	D3MOF3	357048	314790	No
20	**D3MOF4**	**386123**	**340678**	**Yes**
21	D3SMOF1	73590	69441	No
22	D3SMOF2	297741	264029	No
23	D3SMOF3	315968	280633	No
24	D3SMOF4	350998	315044	No

E(x) = Revenu monétaire moyen calculé par le modèle DSSAT et F(x) = Coefficient de Gini

3.3. Discussion

Les résultats obtenus à l'issue de la simulation par le modèle DSSAT montrent que les rendements grain et paille et la biomasse totale sont fonction des principaux facteurs utilisés (densité de semis, fumure organique et formules d'engrais).

Le modèle a généralement surestimé les rendements grain et paille et la biomasse totale. La comparaison entre les résultats observés et simulés a donné des valeurs de R^2 de ces trois paramètres respectivement de 74% pour les rendements grains, 72% pour les rendements paille et 81% pour la biomasse totale. Ces valeurs sont en accord avec la méthode d'évaluation de la performance du modèle donnée par Wilmott et *al.* (1985) et Wallach et Goffinet (1987). L'erreur moyenne normalisée de prédiction NRMSE du rendement grain est de 13% et celle la biomasse totale de 28%. Elles sont respectivement dans l'intervalle bon et acceptable de prévisions de la performance du modèle proposé par Jamieson et *al.* (1991) et

Loague et Green (1991). Par contre, l'erreur moyenne normalisée de prédiction (NRMSE) du rendement paille est de 43%. Le modèle est relativement moins performant pour la simulation des rendements paille (Jamieson *et al.*, 1991 ; Loague et Green, 1991). Les valeurs de rendement paille surestimées peuvent être dues aux erreurs expérimentales ou une simulation avec biais par le modèle. Les biais dans les prédictions des rendements absolus peuvent être imputables à la non simulation par le modèle des effets limitant des mauvaises herbes, des maladies, et de tout autre facteur pouvant limiter les rendements paille. Ces résultats sont semblables à ceux de Nurudeen (2011) et Balogoun (2012) qui ont obtenus les résultats de simulations avec une NRMSE supérieure à 30%.

De l'analyse saisonnière, il ressort que l'application de la matière organique avec la formule d'engrais (74N-20P-23K) à la densité intermédiaire D2 (D2MOF3) est la meilleure combinaison pour une production intensive du maïs. Cependant, l'analyse financière recommande le traitement D3MOF4 comme le traitement le plus économiquement efficient. Le coût élevé du potassium pourrait donc expliquer le fait que la combinaison D2MOF3 ne soit économiquement rentable. Toutefois, cette combinaison pourrait être conseillée du fait d'une part de la nécessité d'apport de potassium pour assurer une nutrition minérale équilibrée et d'autre part par la subvention de l'engrais combiné NPK.

3.4. Discussion générale

Les résultats de l'expérimentation et ceux obtenus de la simulation par le modèle DSSAT montrent que les rendements sont fonction des traitements (densité de semis, fumure organique et formules d'engrais). En effet, les résultats de l'expérimentation ont montré que la formule 74N-20P-23K combinée avec la matière organique était la fertilisation organo-minérale efficiente. Aussi, ils indiquent que toutes les densités de semis pouvaient permettre d'intensifier la production du maïs dans la zone d'étude à condition que le sol soit bien fertile.

Pour ce qui est de la modélisation, la comparaison des données simulées à celles observées montrent que la simulation a surestimé le rendement grain, le rendement paille (la biomasse produite) et la biomasse totale par rapport aux résultats mesurés. Cette surestimation des valeurs par le modèle rapproche les points de l'axe des valeurs simulées (Dzotsi, 2002). Tous les coefficients de corrélation sont supérieurs à 70% pour ces 3 paramètres. Plus de 70% des variations dans les valeurs mesurées sont donc expliquées par le modèle. Les erreurs moyennes normalisées de prédiction (NRMSE) sont de 13% pour le rendement grain, de 43% pour le rendement paille et 28% pour la biomasse totale. Cependant, il faut noter les biais dans

les prédictions des rendements absolus plus précisément au niveau de rendement paille. Ceux-ci sont surtout imputables aux différents stress liés certainement aux conditions de l'expérimentation (eaux, nutriments, des mauvaises herbes, des maladies, et de tout autre facteur pouvant limiter le développement et la croissance des cultures). Ce qui indique que le modèle est donc performant dans la simulation des rendements grains et paille et de la biomasse totale du maïs malgré les surestimations obtenues. Aussi, l'application du modèle DSSAT à l'analyse saisonnière confirme les résultats de l'expérimentation quant à la recommandation du traitement D2MOF3 comme traitement efficient à l'intensification de la production du maïs. Cependant, l'analyse financière recommande la formule 96N-30P combinée à la matière organique à la forte densité 60 cm*40 cm comme le traitement le plus viable économiquement pour le type de sol soumis à l'étude du fait du coût élevé du potassium.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Le premier objectif de cette étude était d'évaluer la réponse d'une culture de maïs aux formules spécifiques d'engrais. Les résultats ont montré que la formule F3 (74N-20P-23K) augmentaient mieux le poids 1000 grains et les rendements grain et paille du maïs. Ils ont révélé aussi que l'efficacité de la dose d'engrais F3 est améliorée avec l'apport de la matière organique. Dans un contexte de contribution à la sécurité alimentaire, les traitements MOF3 sont à recommander puisqu'ils augmentent les rendements. Le modèle DSSAT confirme la supériorité de cette recommandation d'un point de vue biophysique.

Le deuxième objectif était d'évaluer la réponse d'une culture de maïs à l'effet combiné de la fertilisation et de la densité de semis. D'une manière générale, la matière organique a induit une augmentation considérable du poids 1000 grains et des rendements grain et paille du maïs. En présence de la matière organique, la formule F3 (74N-20P-23K) donne une meilleure réponse sur le poids 1000 grains et les rendements grain et paille. Cependant, en absence de matière organique, c'est la formule F4 qui répond mieux que la formule F3. L'analyse des résultats a révélé que les densités de semis D1 (80 cm*40 cm) et D2 (70 cm*40 cm) ont entraîné une augmentation du poids 1000 grains par rapport à la forte densité D3 (60 cm*40 cm). L'analyse agronomique a relevé des résultats comparables quant à la réponse du maïs à l'effet combiné de la fertilisation et de la densité de semis. En effet, la fumure organo-minérale MOF3 a entraîné une augmentation significative du poids de 1000 grains quelle que soit la densité de semis. En somme, la fertilisation organique combinée avec la formule 74N-20P-23K à la densité 70cm*40cm est le meilleur traitement à recommander.

Le troisième objectif a concerné la validation des recommandations de fertilisation du maïs dans la zone Est du Burkina Faso avec le modèle DSSAT. En effet, de l'évaluation du modèle CERES-Maize de DSSAT, il ressort que les prédictions du modèle ont été en général acceptables. L'application du modèle à l'évaluation pluriannuelle de la production a permis de représenter quantitativement le risque agro-climatique sur la culture de maïs. L'analyse saisonnière par le modèle DSSAT a indiqué que c'est le traitement D2MOF3 qui présente moins de risque en termes de variabilité climatique pour le producteur. Cependant, l'analyse financière préconise le traitement D3MOF4 comme le traitement le plus stable sur le plan agro-économique compte tenu du coût élevé du potassium.

Le modèle DSSAT est globalement performant dans la prédiction des paramètres de rendement du maïs. Par conséquent, le modèle DSSAT est un bon outil d'aide à la prise de

décision. Il peut être utilisé comme un outil de développement des recommandations d'options technologiques spécifiques au site pour améliorer la production de maïs dans le cadre de la gestion intégrée de la fertilité des sols au Burkina Faso.

En perspectives pour un développement meilleur et dans l'optique d'une agriculture intensive et durable dans la région de l'Est, nous recommandons :

- d'étendre les présents résultats pour les autres variétés de maïs adaptées à la région de l'Est pour prendre en compte la diversité des sols de la région ;
- d'adapter les mêmes traitements utilisés sur la station expérimentale en milieu paysan afin d'en tirer des résultats définitifs nécessaires à la validation des recommandations de fertilisation et de choix de densités de semis spécifiques pour la zone de l'Est ;
- d'utiliser le modèle DSSAT pour la recommandation des options pour d'autres cultures afin d'optimiser la production ;
- d'adapter la mécanisation en corrélation avec le choix de la densité de semis 70 cm*40 cm avec une fertilisation organo-minérale adaptée pour une production intensive de toute spéculation ;
- de créer un cadre de concertation avec les structures de recherche et le ministère de l'agriculture afin d'harmoniser une bonne vulgarisation des résultats définitifs ;
- de valider la recommandation de l'application de la matière organique combinée avec la formule d'engrais 74N-20P-23K à l'écartement 70 cm*40cm après confirmation des résultats en milieu paysan dans la région de l'Est du Burkina Faso ;
- de faire valoir l'importance du modèle DSSAT dans la recherche et la vulgarisation en tant qu'outil performant d'aide à la décision.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Afnor, 1981. Détermination du pH. (Association française de normalisation) NF ISO 103 90. *In*: AFNOR, Qualité des sols, Paris, 339-348.

Ahmadi N., Chantereau J., Letheve C.H., Marchand J.L., & Ouendeba B., 2006. Les céréales in : MAE, CIRAD, GRET, Mémento de l'agronome. Editions du GRET-CIRAD. Pp.777-792.

Alexandrov V. A. and Hoogenboom G., 2001. The impact of climate variability and change on crop yield in Bulgaria. *Agricultura Forest Meteorology* 104: 315–327.

Bado B. V., Sedogo M. P., Cescas M. P., Lompo F. et Bationo A., 1997. Effet à long terme des fumures sur le sol et les rendements du maïs au Burkina Faso. Cahiers Agricultures 6 (6) : 571 – 575.

Bado B. V., 2002. Rôle des légumineuses sur la fertilité des sols ferrugineux tropicaux des zones guinéenne et soudanienne du Burkina Faso. Thèse Doctorat. Université Laval Québec, Canada. 197p.

Bagayogo M., 2012. Effects of plant density, organic matter and nitrogen rates on rice yields in the system of rice intensification (sri) in the "office du Niger" in Mali. ARPN Journal of Agricultural and Biological Science 7 (8) : 620–632.

Balogoun I., 2012. Essais de validation des formules d'engrais et des périodes de semis issues du modèle DSSAT pour la production de maïs (*Zea mays* L.) au Sud et Centre Bénin. Mémoire Diplôme d'Etudes Approfondies (D.E.A), Option : Ressources Phytogénétiques et Protection des Cultures (RPPC), Spécialité Sciences du sol de la Faculté des Sciences Agronomiques (FSA) de l'université d'Abomey - Calavi (UAC) du Bénin. 78p.

Bationo A., Ndunguru B. J., Ntare B. R., Chrictianson C. B. & Mokwunye A. U., 1991. Fertilizer management strategies for legume-based cropping systems in the West African Semi-Arid Tropics. In: Phosphorous nutrition of grain legumes in the semi-arid tropics. Johansen, C., Lee, K.K., and Sahrawat, K. L. eds, 213-226. ICRSAT, Patancheru, A. P. 502324, India.

Bationo A. & Mokwunye A. U., 1991. Alleviating soil fertility constraints to increased crop production in West Africa: The experience of the Sahel. In: Alleviating soil fertility constraints to increased crop production in West Africa. A. Mokwunye (ed). Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 195-215.

Bationo, A., Nandwa, S.M., Kimetu, J.M., Kinyangi, J.M., Bado, B.V., Lompo, F., Kimani, S., Kihanda, F., Koala, S., 2004. Sustainable intensification of crop-livestock systems through manure management in eastern and western Africa: lessons learned and emerging research opportunities. In:Williams, T.O., Tarawali, S., Hiernaux, P.,

Fernandez-Rivera, S. (Eds.), Proceedings of the International Conference on Sustainable Crop-livestock Production for Improved Livelihoods and Natural Resource Management in West Africa. International Livestock Research Institute, Addis Abeba, Ethiopia, pp. 173–198.

Bationo A., Waswa B., Abdou A., Bado B. V., Bonzi M., Iwuafor E., Kibunja C., Kihara J., Mucheru M., Mugendi D., Mugwe J., Mwale C., Okeyo J., Olle A., Roing K. and M. Sedogo, 2012. Overwiew of long term experiments in Africa. In Lessons learned from long-term soil fertility management experiments in Africa. Bationo A., Waswa B., Kihara J., Adolwa I., Vanlauwe B., and Koala S., Eds, Springer, New York London, pp. 1-26.

Banque Mondiale – Région Afrique (2006). Promoting Increased Fertilizer Use In Africa: lessons Learned and Good Practice Guidelines. Africa Fertilizer Strategy Assessment ESW Technical Report.

Bekunda M. A., Bationo A. & Ssali H., 1997. Soil fertility management in Africa : A review of selected research trials, p. 63-79. *In*: R. J. Buresh *et al.* (ed.) Replenishing soil fertility in Africa. SSSA Special Publication 51, SSSA, Madison, WI.

Bekunda M., 1999. Farmers' responses to soil fertility decline in banana-based cropping systems of Uganda. Managing Africa's Soils No.4. IIED-Drylands Programme, 4 Hanover Street, EH2 2EN Edinburgh, United Kingdom.

Breman H., 1997. Amélioration de la fertilité des sols en Afrique de l'Ouest : contraintes et perspectives. In: Renard, G.; Neef, A. ; Becker, K. et M., von Oppen (éds). Soil fertility management in West African land use systems. Margraf-Verlag, Weikersheim, pp. 7-20.

Bray R.H & Kurtz L.T., 1945. Détermination des formes totales, organiques, et disponibles de phosphore dans les sols. Soil Science, 59 (1945), pp 39-45.

Breman H., & Debrah S.K., 1999. Agricultural intensification within sustainable production systems, In: Soil Fertility Initiative for Sub-Saharan Africa, Proceedings SFI/FAO Consultation, pp.54-55, World Soil Resources Reports 85, FAO, Rome.

Breman H., Groot J.J.R & Vankeulen H., 2001. Resource limitations in Sahelian agriculture. In: Global Environmental Change 11(2001) 59-68. www.elsevier.com/locate/gloenvcha.

Breman, H. & Debrah S.K., 2003. Improving African Food Security. SAIS *Review, vol.* XXIII No.1 (*Winter-Spring* 2003), pp.153-170.

Cox, W.J. 1996. Whole-plant physiological and yield responses of maize to plant density. Agron. J. 88 : 489-496.

Delforge, J., 1984. Sur l'identifiabilité et l'identification des modèles linéaires. Exemples d'application dans le cadre de la théorie des systèmes de transformations. Thèse de Doctorat ès Sciences, Université d'Angers, France, 388p.

Delville P. L., 1996. Gérer la fertilité des terres dans les pays du Sahel. *Diagnostic et conseil aux paysans.* Collection "le point Sur".GRET. Ministère Français de la Coopération. CTA. 397p.

Deumier J.M, Lacroix B. & Bouthier A., 1990. Alimentation et production du maïs en période préfloraison et élaboration du rendement en grain, In Physiologie du maïs : INRA, Colloque de Pau 1315/11/90, pp.359-366.

DGPER, 2010. Analyse de la Compétitivité des Filières de Céréales Sèches au Burkina Faso. MAHRH Presse: Ouagadougou.

Drabo I., 2009. Evaluation participative de la capacité nutritive des sols et des bilans minéraux dans les exploitations agricoles du micro bassin versant du Zondoma, dans le nord du Burkina Faso. Mémoire d'Ingénieur du Développement Rural. Université Polytechnique de Bobo-Dioulasso (UPB), Institut du Développement Rural (IDR), Burkina Faso, 49 p.

Dudal R., 2002. Forty years of soil fertility work in sub-Saharan Africa. In: Vanlauwe, B., Diels, J., Sanginga, N., Merckx, R. (Eds.), Integrated Plant Nutrient Management in sub-Saharan Africa: From Concept to Practice. CAB International, Wallingford, UK.

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 extrems of wheat and maize crop performance in the tropics, Proceedings of a workshop. CIMMYT, El Batan (Mexico), 19-22 April 1999, Mexico, D.F. CIMMYT.

Dzotsi K., 2002. Application du modèle CERES-maize de DSSAT à l'analyse de stratégies de semis pour le maïs (*Zea mays* L.) dans les conditions de Sévé-Kpota. Mémoire d'Ingénieur Agronome, UL-ESA, Lomé, 92 p.

Falisse A. & Lambert J., 1994. Fertilisation minérale et organique. *In :* TAYEB AMEZIANI: E.H.: PERSOONS E. Agronomie moderne : Bases physiologiques et agronomiques de la production végétale. Hatier-AUPELF-UREP, pp 377-398.

Fetcher, J., B. E. Allison, M. V. K. Sivakumar, R. R. Van Der Ploeg, J. Bley., 1991. An evaluation of the SWATRER and CERES-Millet models for southwest Niger. *In*: M. V. K. Sivakumar, J. S.Wallace, C. Renard, C. Giroux, (eds.), Soil Water Balance in the Sudano-Sahhellian Zone. International Association of Hydrological Sciences, Wallingford, UK, pp. 505–513.

Fontes J. et Guinko, S., 1995. Carte de la végétation et de l'occupation du sol du Burkina Faso. Ministère de la Coopération Française: projet campus (88 313 101).

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

Giasson P. & Jaouich A., 2008. Les propriétés chimiques du sol. 46p.

GNIS, 2007. Physiologie et reproduction du maïs. (http://www.gnis-pedagogie.org/mais-plante-physiologie-reproduction.html consulté le 29/09/2012).

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

He J., Porter C., Wilkens P., Marin F., Hu H., And Jones J. W., 2010. Guidelines For Installing And Running Glue Program. In 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., and Tsuji G.Y., 2010. Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT) Version 4.5 [CD-ROM]. University of Hawaii, Honolulu, Hawaii.

Henao J. & Baanante C., 1999. Estimation rates of nutrient depletion in soils of agricultural lands of Africa. IFDC, Muscle Shoals, Alabama 35662 – USA. 76 p.

Henao J. & Baanante C.A., 2006. Agricultural Production and Soil Nutrient Mining in Africa. Summary of IFDC Technical Bulletin, IFDC, Muscle Shoals, Alabama, USA.

Honfoga G B., 2007. Vers des systèmes privés efficaces d'approvisionnement et de distribution d'engrais pour une intensification agricole durable du Bénin. Thèse Doctorat. Université de Groningen. 406p.

Hoogenboom G., Wilkens P.W & Tsuji G.Y (Eds.) 1999. DSSAT v3, University Of Hawaii, Honolulu, Hawaii.

INERA, 1993. Caractérisation des stations de recherches agronomiques de Di, Katchari et Kouaré. *Rapport technique*, pp 69-82.

INSD, 2006. Fichier village RGPH 06 Fada N'Gourma. Burkina Faso.

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 40 Research 27: 337–350.

Janssen, B.H., Guiking F.C.T., Braakhekke W.G., Dohme P.A.E., 1992. Quantitative evaluation of soil fertility and the response to fertilizers. Wageningen Agricultural University, Wageningen, The Netherlands, 36pp.

Jones C. A. & Kiniry J. R., 1986. CERES Maize : A simulation model of maize growth and development. Texas A & M University Press: 165p.

Jones J. W., Hunt L. A., Hoogenboom G., Godwin D. C., Singh U., Tsuji G. Y., Pickering N. B., Thornton P. K., Bowen W. T., Boote K. J., & Ritchie J. T., 1994. Input and

out files. In: Hoogenboom G., Wilkens P.W., and Tsuji G.Y. *DSSAT v3 Vol. 4.* University of Hawaii, Honolulu, The United States of America, pp.1-94.

Jones, J. W., G. Hoogenboom, C. H. Porter, K. J. Boote, W. D. Batchelor, L. A. Hunt, P. W. Wilkens, U. Singh, A. J. Gijsman and J. T. Ritchie., 2003. The DSSAT cropping system model. *European Journal of Agronomy* 18:235-265.

Kabore W.T., 2010. Amélioration de la valorisation agricole des déchets urbains après compostage : Influence de la nature et des proportions des substrats initiaux sur les valeurs amendantes et fertilisantes des composts. Thèse unique du grade de Docteur. Université de Ouagadougou /UFR SVT, 240p.

Keating B. & Grace P., 1999. Using biophysical simulation models to access the performance of agriculture systems in risky environments. In: *CIMMYT – Risk Management for maize Farmers in Drought-prone areas of southern Africa; Proceedings of a workshop held at Kadoma Ranch, Zimbabwe, 1 – 3 October 1997.* Mexico, D. F.: 67 – 82.

Kelly V.A., Crawford E.W. & T.S. Jayne, 2003. Agricultural input use and market development in Africa: Recent perspectives and insights. *MSU Policy Synthesis No. 70, USAID Africa Bureau Office of Sustainable Development.*

Kobayashi K. & Us Salam M., 2000. Comparing simulated and measured values using mean squared deviation and its components. *Agronomy Journal* 92: 345 – 352.

Lesschen J.P., Stoorvogel J.J. & Smaling E.M.A, 2005. Bilan des éléments nutritifs du sol à différentes échelles. Application des méthodes intermédiaires aux réalités africaines. Bulletin FAO. Engrais et nutrition végétale.

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.

Lompo F., 2009. Effets induits de la fertilité des sols sur les états du phosphore et la solubilité du phosphate naturel dans deux sols acides du Burkina Faso. Thèse de Docteur d'Etat. Université de Cocody/l'UFR STRM.254p.

Mando A., 1998. Soil-dwelling termites and mulches improve nutrient release and crop performance on crusted Sahelian soils. Arid Soil Res.Rehab.12, 153-164.

Mathieu C. & Pieltain F., 1998. Analyse physique des sols: méthodes choisies. Lavoisier, Paris.

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, U.K.

Mitchell P.L., 1997. Misuse of regression for empirical validation of models. *Agricultural Systems* 54: 313 – 326.

MFAA, 2006. Indicateurs de durabilité des exploitations agricoles. http://www.idea.portea.fr/index.php?id=26. Consulté le 31/08/ 2012.

Mokwunye A. U., A. De Jager, and E. M. A. Smaling (EDS.)., 1996. Restoring and maintaining the productivity of West African soils: Key to sustainable development. *Misconception of Fertilizer Studies* 14. International Fertilizer Development Central-Africa, Lome, Togo.

Nacro H.B., 1997 : Hétérogénéité fonctionnelle de la matière organique dans un sol de savane humide (LAMTO, Côte-d'Ivoire) : Caractérisation chimique et étude, in vitro, des activités microbiennes de minéralisation du carbone et de l'azote. Thèse de Doctorat, Spécialité Ecologie Générale. Université Pierre et Marie Curie, Paris, 302 p.

Newman S., Lynch T., & Plummer A.A., 1999. Aspects of success and failure of decision support systems in agriculture. In: Abbass, H.A. and M. Towsey (Eds.): *Inaugural Australian Workshop on the Application of Artificial intelligence, Optimisation and Bayesian methods in Agriculture*, p. 17-30. Queensland University of Technology Press, Brisbane.

Novozansky I. V. J. G. H., Van Eck R. And Van Vark W. 1983. A novel digestion technique for multi-element analysis. In: commun. Soil Sci. Plant anal. pp 239-249.

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. 151 p.

Ouédraogo E., Mando A., Zombré N.P., 2001. Use of compost to improve soil properties and crop productivity under low input agricultural system in west Africa. Agriculture-Ecosystems and Environment 84, 259-266.

Ouédraogo E., 2004. Soil quality improvement for production in Semiarid West Africa. Tropical Resource Management papers These Doctorat, Wageningen University. 193p.

Ouédraogo S., 2005. Les déterminants de la sécurité alimentaire dans le Plateau Central du Burkina Faso. *Ph.D. Thesis, Centre for Development Studies, University of Groningen.*

Ouédraogo E., Mando A., Brussaard L & Stroosnijder L., 2007. Tillage and fertility management effects on soil organic matter and sorghum yield in semi-arid West Africa. Soil and Tillage Research 94, 64-74.

Ouédraogo J., 2011. Etude de l'impact de la macrofaune et des modes de gestion de la fertilité du sol sur quelques caractéristiques chimiques et microbiennes d'un sol ferrugineux tropical lessivé sous climat semi-aride au Burkina Faso. Mémoire D.E.A en

Gestion intégrée des ressources naturelles. Option : Systèmes de production végétale/Spécialité : Sciences du sol. Burkina Faso, IDR/UPB. 73 p.

Paz J.O., Batchelor W.D., & Tylka G.L., 2001. Estimating potential economic return for variable rate management in soybeans. *Transactions of American Society of Agricultural Engineers* 44 (5): 1335-1341.

Paz J.O., Batchelor W.D. & Jones J.W., 2003. Estimating potential economic return for variable rate soybean variety management. *Transactions of American Society of Agricultural Engineers* 46 (4): 1225–1234.

PCD, 2008. Rapport final du Plan communal de Développement de Fada N'Gourma. 100p.

PNTTA, 2000. Les engrais minéraux. *Caractéristiques et Utilisation.* Bulletin mensuel d'information et de liaison du PNTTA. Transfert de Technologie en Agriculture N°72/Septembre 2000, Rabat. http://agriculture.avh.org.

Quemada, M., & M. L. Cabrera., 1995. CERES-N model predictions of nitrogen mineralized from cover crop residues. *Soil Science Society of American Journal* 59: 1059–1065.

Rabat., 2003. Les engrais et leurs applications. Quatrième édition. 77 p.

RECA, 2010. La fertilité des sols. Bulletin trimestriel d'information du Réseau National des Chambres d'Agricultures du Niger. N°07- Janvier 2010. www.reca-niger.org/IMG/pdf/RECA_Info7_article_**fertilite_sols**.pdf.Consulté le 20/09/2012.

Rouanet G., 1984. Le maïs. Collection « Le technicien d'Agriculture tropicale ». Édition Maisonneuve et Larose, Paris, France, 142 p.

Sanchez P.A., Shepherd K.D., Soule M.J., Place F.M., Mokwunye A.U., Buresh R.J., Kwesiga F.R., Izac A.N., Ndiritu C.G., Woomer P.L., 1997. Soil fertility replenishment in Africa: An investment in natural resource capital. In: Buresh R.J., Sanchez P.A. (éd.). Replenishing soil fertility in Africa. Madison, USA, Soil Science Society of America and American Society of Agronomy, SSSA Special Publication.

Sanou J., 2007. Variété de maïs Barka, fiche technique/ Programme Céréales/ INERA-Burkina Faso.

Sarr B. & Lona I., 2009. Les fortes pluies et les inondations enregistrées au Sahel au cours de l'hivernage 2007 : variabilité et /ou changement climatique. 14ème Colloque International, SIFEE «Changement climatique et évaluation Environnementale» Outils et enjeux pour l'évaluation des impacts et l'élaboration des plans d'adaptation, Niamey.

Sarr B., Kafando L. & Atta S., 2011. Identification des risques climatiques de la culture du maïs au Burkina Faso. Int. J. Biol. Chem. Sci. 5(4): 1659-1675, August 2011, ISSN 1991-8631.

Singh U. & Wilkens P. W., 2001. Simulating water and nutrient stress effects on phenological developments in maize. In: J.W. White 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.

Sedogo P.M., 1981. Contribution à la valorisation des résidus culturaux en sol ferrugineux et sous climat tropical semi-aride. (Matière organique du sol et nutrition azotée des cultures). Thèse d'université, agronomie, Lorraine, France, 195p.

Sedogo P.M., 1993. Évolution des sols ferrugineux lessivés sous culture: incidence des modes de gestion sur la fertilité. Thèse de Doctorat Es-Sciences. Université National de Côte d'Ivoire. 295 p.

Sedogo P. M., Lompo F., Ouattara B., 1994. Etude des effets des substrats organiques sur l'évolution du statut organique du sol dans ses différents compartiments INERA Ouagadougou. Sc. et tech. Vol 21 n°1 pp. 114-122.

Sedogo P. M., Hien V., Lompo F., 1994 : Gestion de la fertilité des sols au Burkina Faso. Bilan et perspectives pour la promotion de systèmes agricoles durables dans les pays d'Afrique soudano-sahélienne ; Séminaire régional, Dakar, Sénégal FAO/CIRAD, pp7-12.

Smaling E. M. A., 1993. Soil nutrient depletion in sub-Saharan Africa. *In*: H. van Reuler and W. H. Prins (eds.), The Role of Plant Nutrients for Sustainable Food Crop Production in Sub-Saharan Africa. Leidschendam, The Netherlands: VKP (Dutch Association of Fertilizer Producers).

Steichen, R., 1994. Communication au forum sur "L'agriculture intégrée, base d'une agriculture durable en Europe". In: Fertilizer Focus, Août 1994, p.38. Stern, L.W., A.I. El-Ansary & A.T. Coughlan, 1996. Marketing channels, 5th Edition. Prentice Hall-International, Inc.

Stoorvogel J.J. & Smaling E. 1990. Assesment of soil nutrient depletion in sub-Saharan Africa, 1983-2000. Vol.1 Main Report 28, DLO. The Winang Staring Centre for Integrated Land, Soil and Water Research (SC-DLO), Wageningen, the Netherlands, 137p.

Struif Bontkes T.E., 1999. *Modelling the dynamics of agriculture development: a process approach – the case of Koutiala (Mali)*. Tropical resource management Papers 25. Wageningen University and Research Centre, the Netherlands, 233pp.

Struif Bontkes T.E. & Wopereis M.C.S., 2003. Outils d'aide à la décision pour l'agriculture en Afrique sub-saharienne. *Un guide pratique*. IFDC-CTA ; 223p.

Tsuji G., Uehara G. & Balas S., 1994. DSSAT v3: *A Decision Support System for Agrotechnology Tranfer*, 3 volumes. University of Hawaii, Honolulu, the United States of America.

Thibault E., 2001. Impact de différentes densités de semis en fonction des propriétés du sol dans la culture du maïs-grain. Colloque mais-soya *MIEUX SAVOIR POUR MIEUX AGIR*. www.agrireseau.qc.ca/grandescultures/Documents/Eric_Thibault.pdf

Vanlauwe B., Aihou K., Aman S., Iwuafor E.N.O. Tossah B.K., Diels J., Sanginga N., Merckx R. & Deckers S., 2001. Maize yield as affected by organic inputs and urea in theWest-African moist Savanna. Agron. J. 93, 1191–1199.

Vanlauwe B., 2004. Integrated soil fertility management research at TSBF: the framework, the principles, and their application. In: Bationo, A. (Ed.), Managing Nutrient Cycles to Sustain Soil Fertility in sub-Saharan Africa. Academy Science Publishers, Nairobi, pp. 25–42.

Vanlauwe B. & Giller K.E., 2006. Popular myths around soil fertility management in Sub-Saharan Africa. Elsevier. Agriculture, Ecosystems and Environment 116 (2006) 34–46.

Wafula B. M., 1995. Application of crop simulation in agriculture extension in Kenya. *Agricultural Systems* 49: 399 – 412.

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

Walinga I., Van Vark W., Houba V. J. G. et Van Der Lee J.J., 1989. Plant analysis procedures. Dpt. Soil Sc. Plant Nutr. Wageningen Agricultural university. Syllabus, part 7. pp 197-200.

Walkley A. & Black I.A., 1934. An examination method of the detjareff and a proposed modification of the chromic acid titration method. Soil Science 37: 29-38.

Wey J., 1998. Etude de la variabilité du rendement du maïs au Burkina Faso. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy. 200p.

Willmott C. J., Ackleson S. G., Davis R.E., Feddema J. J., Legates K. M., Legates D. R., O'connell J., and Rowe C.M., 1985. Statistics for the evaluation and comparison of models. *Journal of Geophysical Research* 90 (5): 8995–9005.

Youl S., 2009. Dynamique et modélisation de la dynamique du carbone dans un agrosystème de savane de l'Ouest du Burkina Faso. Université Polytechnique de Bobo-Dioulasso : Option: Gestion Intégrée des Ressources Naturelles ; Spécialité : Science su sol. Bobo-Dioulasso (Burkina), Université Polytechnique de Bobo-Dioulasso : 193.

Youl S., Ezui G., Pare T. et Mando A., 2011. Mise à jour des recommandations d'engrais, Burkina Faso. Rapport Technique. IFDC. Juin 2011.

Zomboudré G., 2003. Relations hydriques et productivité des cultures dans un système agroforestier traditionnel : cas du maïs (*Zea mays* L.) associé au karité (*Vitellaria paradoxa* Gaertn.) Dans la zone est du Burkina Faso. Diplôme d'études approfondies (D.E.A.) en sciences biologiques appliquées. Option : Biologie et Ecologie Végétales. Université de Ouagadougou. 47p.

ANNEXES

Annexe1 : Fiche technique de la variété de maïs Barka

Nom : **Barka**	Synonyme : Farako-Bâ Drought Resistant n°2
Origine Génétique : brassage de 6 lignées résistantes à la sécheresse, extraites dans Pool 16 DT (IITA) Géographique : Farako-Bâ, Burkina (IN.E.R.A) **Caractères agro-morphologiques** Cycle semis-floraison mâle : 42 jours après semis Cycle semis-maturité : 80 jours en grain Hauteur de la plante : 175 cm Hauteur d'insertion de l'épi : 80 cm Résistance à la verse : bonne Résistance à la casse: bonne Maladies et ennemis des cultures Helminthosporiose : résistance Rouille: résistance Viroses (MSV): résistance Foreurs : non testée Insectes de stock : non testée Striga: non testée Autres : Sécheresse en culture : résistance	Type variétal: variété composite **Caractères du grain** Couleur: blanche Texture : comé Forme: cunéiforme Utilisation Humaine: tô, couscous, grillade Animale : grain, fourrage Industrielle: brasserie, amidonnerie Rendement en grain: 5,5t/ha Vocation Aire de culture : Pluviométrie <750mm Spécial Sahel Intensification : Agriculture traditionnelle Agriculture semi-intensive
Points **Résistance à la sécheresse** • Tolérance aux **fortes densités**	Points faibles • Sensibilité inconnue au striga
Source : SANOU J., 2007 : nouvelles variétés de maïs vulgarisées au Burkina Faso. Doc CNRST/INERA Burkina Faso	

Annexe 2 : Calendrier cultural de l'expérimentation à Kouaré

Opérations culturales	**Date**
Labour	09/07/2012
Prélèvement échantillons de matière organique et de Sol	13/07/2012
Apport de fumure organique	18/07/2012
Semis	20/07/2012
1er apport de fumure minérale (NPK et DAP)	11/08/2012
2ème apport de fumure minérale (Urée)	04/09/2012
1er sarclage	11/08/2012
2ème sarclage	25/08/2012
Buttage	04/09/2012
Récolte	09/11/2012

Annexe 3 : Synthèse ANOVA

Facteurs	DDL	Poids 1000 grains		Rendements grain		Rendements paille	
		Probabilité	Signification	Probabilité	Signification	Probabilité	Signification
Densité de semis	2	<,001	THS	0,786	NS	0,857	NS
Matière Organique	1	<,001	THS	<,001	THS	<,001	THS
Fertilisation	3	<,001	THS	<,001	THS	<,001	THS
Densité*Matière Organique	2	0,775	NS	0,236	NS	0,022	S
Densité de semis*Fertilisation	6	0,047	S	0,399	NS	0,887	NS
Matière organique*Fertilisation	3	0,010	HS	0,256	NS	0,342	NS
Densité*Matière Organique*Fertilisation	6	0,007	HS	0,701	NS	0,402	NS

DDL : degré de liberté ; **THS** : très hautement significatif ; **HS** : hautement significatif ; **S** : significatif ; **NS** : non significatif

Annexe 4 : Effet de l'interaction entre densité de semis*matière organique*formules d'engrais sur les rendements grain et paille du maïs

	Rendement Grain						Rendement Paille					
Traitements	Avec MO			Sans MO			Avec MO			Sans MO		
	D1	D2	D3	D1	D2	D3	D1	D2	D3	D1	D2	D3
T1	1641	1711	1339	1172	1265	670	2656	2530	2232	1641	1637	1339
T2	2344	2604	2306	1562	1637	2306	4453	4315	3497	1875	2083	3199
T3	3125	3274	2827	2187	1667	1984	4141	4092	3571	2812	2426	3571
T4	2500	3051	2877	2031	1984	2158	4219	4167	4360	2734	2902	3274
Probabilité	0,70						0,40					
Signification	NS						NS					
CV %	27,00						26,20					