



CENTRE RÉGIONAL AGRHYMET



DÉPARTEMENT FORMATION ET RECHERCHE

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES POUR L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTERE EN GESTION DURABLE DES TERRES

Promotion : 2013 – 2014

Présenté par : **M. Manace BATIONO**

Effet de la variabilité climatique sur la productivité du mil [*Pennisetum glaucum (L.) R.Br.*] dans un essai de gestion à long terme de la fertilité du sol en zone sahélienne du Niger : approche par le modèle DSSAT

Soutenu le 14 novembre 2014 devant le jury composé de :

Président : Pr Hassan Bismarck NACRO, Centre Régional AGRHYMET, Niamey (Niger)

Membres : Dr Benoît SARR, Centre Régional AGRHYMET, Niamey (Niger)

Dr Mouhamed LY, Centre Régional AGRHYMET, Niamey (Niger)

Maître de stage :

Dr Mahamadou GANDAH, Centre Sahélien de l'ICRISAT, Sadoré (Niger)

Directeur de mémoire :

Dr Seydou B. TRAORÉ, Centre Régional AGRHYMET, Niamey (Niger)

Dédicace

À toute la famille BATIONO.

*Le travail, après le travail, l'indépendance.
N'être à la charge de personne ; telle doit être la devise de votre génération.
Bernard B. Dadié.*

Remerciements

Aucun travail ne s'accomplit à bien dans la solitude. Il serait donc marrant de dire qu'on n'a besoin de personne si l'on se réfère au fait que l'homme est le fruit de son milieu.

Ainsi, ce travail dont l'aboutissement met fin à ma formation de mastère en Gestion Durable des Terres (GDT) au Centre Régional AGRHYMET, Niamey (Niger), n'aurait été possible sans une longue chaîne de bienveillance et d'efforts désintéressés de la part de nombreuses personnes auxquelles j'ai le plaisir de présenter ici mes remerciements et l'expression de ma profonde reconnaissance. Je rends Grâce à Dieu pour m'avoir accordé la santé, la volonté et la persévérance qui m'ont permis de réaliser ce travail.

J'adresse mes sincères remerciements à :

- *l'Union Européenne et la Banque Africaine de Développement (BAD) à travers le projet ISACIP pour avoir financé cette formation de mastère en Gestion Durable des Terres ;*
- *Directeur Général du Centre Régional AGRHYMET (CRA) et l'ensemble de son personnel pour les appuis multiples ;*
- *Pr Hassan Bismarck NACRO, Coordonnateur du mastère pour ses appuis multiformes. Sa rigueur et son souci pour le travail bien fait ont été pour nous un enseignement ;*
- *l'ensemble du corps enseignant pour les connaissances acquises et la qualité de la formation que j'ai reçue ;*
- *Dr Seydou B. TRAORÉ, Expert Agro météorologue et mon Directeur de mémoire pour tout le soutien apporté mais surtout pour l'excellent encadrement dont j'ai bénéficié.*

Toute ma reconnaissance à Dr Mahamadou GANDAH, Coordonnateur Régional du projet AGRA Microdose et Représentant Régional de l'ICRISAT-Afrique de l'Ouest pour avoir accepté d'être mon Maître de stage et pour l'excellent encadrement dont j'ai également bénéficié. Malheureusement, il a perdu la vie tout juste après la soutenance de ce mémoire. Je tiens à exprimer mes sincères condoléances à toute sa famille. Paix à son paix !

Je ne saurais oublier M. Abdou ADAMOU pour l'organisation de ce stage, sa disponibilité, ses orientations scientifiques et ses conseils pour la rédaction du mémoire.

Je remercie ma famille pour leur assistance et bénédictions, et tous mes amis et collègues étudiants pour leur soutien.

Mon regret serait sans égal si je devrais vous sembler ingrat.

Veillez trouver dans ce mémoire, l'expression de ma profonde gratitude !

Liste des tableaux

Tableau I : Quantités de résidus de mil, d’engrais minéraux et de fumier apportés -----	18
Tableau II : Composition chimique du fumier de bovin et des résidus de mil -----	18
Tableau III : Caractéristiques agromorphologiques de la variété CIVT -----	21
Tableau IV : Prix de vente et coûts de production de mil dans la zone d’étude-----	28
Tableau V : Rendements moyens annuels en grain (système mil continu, 1998-2013)-----	33
Tableau VI : Rendements moyens annuels en grain en fonction des traitements (système mil continu, 1998-2013)-----	34
Tableau VII : Rendements moyens annuels en grain (système mil en rotation avec le niébé, 1998-2013) -----	35
Tableau VIII : Rendements moyens annuels en grain en fonction des traitements (système mil en rotation avec le niébé, 1998-2013) -----	36
Tableau IX : Rendements moyens annuels en grain (système mil en association avec le niébé, 1998-2013) -----	37
Tableau X : Rendements moyens annuels en grain en fonction des traitements (système mil en association avec le niébé, 1998-2013)-----	38
Tableau XI : Rendements moyens en grain en fonction des systèmes de culture (1998-2013) -----	39
Tableau XII : Résultats de l'ajustement des coefficients génétiques du cultivar CIVT -----	46
Tableau XIII : Analyse stratégique et financière des différents traitements sur 31 ans (système mil continu et système mil en rotation avec le niébé) -----	56
Tableau XIV : Analyse stratégique et financière des différents traitements sur 31 ans (système mil en association avec le niébé) -----	57

Liste des figures

Figure 1 : Localisation géographique du Centre Sahélien de l'ICRISAT de Sadoré -----	15
Figure 2 : Pluviométrie annuelle et nombre de jours de pluie du C.S.I (1983-2013) -----	16
Figure 3 : Plan de masse de l'essai d'évaluation des effets à long terme de l'application combinée du fumier de bovin, des résidus de récolte et des engrais minéraux sur la productivité de mil en zone sahélienne (Centre Sahélien de l'ICRISAT, Sadoré, Niger) -----	19
Figure 4 : Evolution de la pluviométrie annuelle et du nombre de jours de pluie du C.S.I (1998-2013)-----	31
Figure 5 : Diagramme ombro-thermique du C.S.I (1998-2013) -----	32
Figure 6 : Evolution de la radiation solaire mensuelle du C.S.I (1998-2013)-----	32
Figure 7 : Stades de développement du mil et répartition de la pluviométrie en 1998, 1999, 2007 et 2013 au Centre Sahélien de l'ICRISAT (Sadoré, Niger). Les traits bleus représentent les hauteurs de pluies journalières et les traits noirs, les stades de développement du mil.----	42
Figure 8 : Stades de développement et stress hydrique et azoté dans le cycle du mil (systèmes mil continu et mil en rotation avec le niébé) au Centre Sahélien de l'ICRISAT (Sadoré, Niger) -----	44
Figure 9 : Stades de développement et stress hydrique et azoté dans le cycle du mil (système mil en association avec le niébé) au Centre Sahélien de l'ICRISAT (Sadoré, Niger) -----	45
Figure 10 : Relation entre rendements grains observés et rendements grains simulés pour le système mil continu au Centre Sahélien de l'ICRISAT (Sadoré, Niger, 1998-2013) -----	48
Figure 11 : Relation entre rendements grains observés et rendements grains simulés pour le système mil en rotation avec le niébé au Centre Sahélien de l'ICRISAT -----	50
Figure 12 : Relation entre rendements grains observés et rendements grains simulés pour le système mil en association avec le niébé au Centre Sahélien de l'ICRISAT (Sadoré, Niger, 1998-2013) -----	52
Figure 13 : Variabilité du rendement grain simulé en fonction des traitements sur une période de 31 ans (systèmes mil continu et mil en rotation avec le niébé)-----	54
Figure 14 : Variabilité du rendement grain simulé en fonction des traitements sur une période de 31 ans (système mil en association avec le niébé) -----	55

Sigles et abréviations

AGRHYMET : Agronomie-Hydrologie-Météorologie

C.S.I : Centre Sahélien de l'ICRISAT (Sadoré, Niger)

CERES : Crop Environment Resource Synthesis

CIVT : Composite Inter-Variétal de Tarna, sélectionné par l'INRAN-Niger (cultivar de mil)

CV : Coefficient de variation (%)

DSSAT : Decision System Support for Agrotechnology Transfer (système d'aide à la décision pour le transfert des technologies agricoles ou système agrotechnologique d'aide à la décision)

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

F : Fertilizer (engrais minéraux) (F0, F1, F2) (kg/ha)

F(x) : Coefficient de Gini

ICRISAT : International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics (Institut international de recherche sur les cultures des zones tropicales semi-arides)

JAS : Jours Après Semis

LAI : Leaf Area Index (indice de surface foliaire) (m^2/m^2)

LSD : plus petite différence significative

M : Manure (fumier) (M0, M1, M2) (kg/ha)

MJ/m²/j : Mégajoule par mètre carré par jour

NRMSE : Erreur moyenne normalisée de prédiction

P : Probabilité (%)

R : pearl millet Residue (résidus de mil) (R0, R1, R2) (kg/ha)

R² : Coefficient de corrélation

RMSD : Root Mean Squared Deviation

RMSE : Root Mean Squared Error (Erreur moyenne de prédiction)

Srad : Solar radiation (Radiation solaire) (MJ/m²/j)

SSP : Super Phosphate Simple

TBASE : Température de base (°C)

THS : Très Hautement Significatif

Tmax : Température maximale de l'air (°C)

Tmin : Température minimale de l'air (°C)

TOPT : Température optimale (°C)

TSP : Triple Super Phosphate

Table des matières

Dédicace	i
Remerciements	ii
Liste des tableaux	iii
Liste des figures	iv
Sigles et abréviations.....	v
Résumé	ix
Abstract	x
Introduction	1
Chapitre 1 : Revue de littérature	6
1.1. Contraintes majeures affectant la production du mil au Sahel	6
1.1.1. Contraintes liées au climat	6
1.1.2. Contraintes liées à la fertilité des sols	7
1.2. Pratiques de gestion de la fertilité des sols	8
1.2.1. Résidus de récolte	8
1.2.2. Engrais minéraux	8
1.2.3. Fumier	9
1.2.4. Engrais minéraux combinés aux engrais organiques	10
1.3. Approche de modélisation	12
1.3.1. Outils d'aide à la décision en Agriculture	12
1.3.2. Modèles de simulation des cultures	13
Chapitre 2 : Matériel et Méthodes	15
2.1. Présentation du site d'étude	15
2.1.1. Situation géographique	15
2.1.2. Climat et végétation	15
2.1.3. Sols.....	17
2.2. Données expérimentales	17
2.2.1. Dispositif expérimental	17
2.2.2. Conduite de l'essai	20
2.3. Collecte des données	21
2.4. Description du modèle CERES-Millet de DSSAT	21
2.4.1. Données d'entrées minimales du modèle.....	23
2.4.2. Méthodologie d'application du modèle (paramétrage du modèle)	23
2.4.2.1. Calage du modèle	24

2.4.2.2. Simulation et données de sortie.....	25
2.4.2.3. Evaluation de la performance du modèle (validation)	26
2.4.2.4. Application du modèle à la prédiction des rendements (analyse saisonnière) .	28
2.4. Traitement et analyse statistique des données	29
Chapitre 3 : Résultats	30
3.1. Pluviométrie, température et radiation solaire au cours de la période d'essai.....	30
3.2. Effet à long terme des traitements sur les rendements grain du mil	33
3.2.1. Système mil continu.....	33
3.2.2. Système mil en rotation avec le niébé.....	35
3.2.3. Système mil en association avec le niébé	37
3.2.4. Effet des systèmes de culture	39
3.3. Températures de l'air.....	39
3.4. Radiation solaire	40
3.5. Facteurs liés à la pluviométrie	40
3.5.1. Quantité de pluie enregistrée.....	40
3.5.2. Longueur de la saison	40
3.5.3. Répartition de la pluie	41
3.6. Stades de développement et stress hydrique et azoté dans le cycle du mil	43
3.7. Résultats de la simulation de la croissance et du développement du mil	46
3.7.1. Calage du cultivar	46
3.7.2. Evaluation de la performance du modèle.....	46
3.7.2.1. Système mil continu	46
3.7.2.2. Système mil en rotation avec le niébé	49
3.7.2.3. Système mil en association avec le niébé.....	51
3.8. Application du modèle à l'évaluation pluriannuelle des traitements	53
Chapitre 4 : Discussion	58
4.1. Effet à long terme des traitements sur les rendements grain du mil	58
4.2. Facteurs climatiques et stades de développement du mil	59
4.3. Performance du modèle DSSAT	61
4.4. Evaluation pluriannuelle des traitements (analyse saisonnière)	63
Conclusion et recommandations	65
Références bibliographiques	67
Annexes.....	x
Annexe I : Caractéristiques chimiques du sol du site avant l'implantation de l'essai (1997). x	

Annexe II : Caractéristiques physico-chimiques du sol du site en 2005	x
Annexe III : Variations de la pluviométrie mensuelle (mm) du C.S.I de 1998-2013.....	xi
Annexe IV : Variations des températures minimales mensuelles (°C) du C.S.I de 1998-2013	xi
Annexe V : Variations des températures maximales mensuelles (°C) du C.S.I de 1998-2013	xii
Annexe VI : Variations de la radiation solaire mensuelle (MJ/m ² /j) du C.S.I de 1998-2013	xii
Annexe VII : Nombre de jours de pluie de mai à octobre par année du C.S.I de 1998-2013	xiii
Annexe VIII : Rendements grain (kg/ha) observés et simulés en fonction des traitements (système mil continu, 1998-2013)	xiv
Annexe IX : Rendements grain (kg/ha) observés et simulés en fonction des traitements (système mil en rotation avec le niébé, 1998-2013)	xvii
Annexe X : Rendements grain (kg/ha) observés et simulés en fonction des traitements (système mil en association avec le niébé. 1998-2013).....	xx
Annexe XI : Rendements grain simulés en fonction des traitements de 1983-2013 (systèmes mil continu et mil en rotation avec le niébé)	xxiii
Annexe XII : Rendements grain simulés en fonction des traitements de 1983-2013 (système mil en association avec le niébé)	xxv
Annexe XIII : Dates des opérations culturales de l'essai 8A	xxvii
Annexe XIV : Présentation du modèle DSSAT	xxviii

Résumé

Le mil est la céréale la plus consommée en zone sahélienne du Niger. L'accroissement de sa productivité est fortement compromis par le faible niveau de fertilité initiale des sols et les conditions climatiques défavorables. L'objectif global de cette étude était d'évaluer l'impact de la variabilité climatique sur les effets à long terme de l'application combinée du fumier, des résidus de récolte et des engrais minéraux sur la productivité du mil en zone sahélienne du Niger en utilisant des données agronomiques et climatiques historiques. Les données agronomiques proviennent de l'essai à long terme conduit de 1998 à 2013 à la station expérimentale du Centre Sahélien de l'ICRISAT (Sadoré, Niger). Le dispositif expérimental utilisé était un split plot à 3 répétitions comparant 27 combinaisons optimales de 3 niveaux de résidus de mil codés R0 (300 kg/ha), R1 (900 kg/ha) et R2 (2700 kg/ha) ; 3 niveaux d'engrais minéraux codés F0 (0 kg N/ha + 0 kg P/ha), F1 (15 kg N/ha + 4.4 kg P/ha) et F2 (45 kg N/ha + 13.1 kg P/ha) et 3 niveaux de fumier de bovin codés M0 (300 kg/ha), M1 (900 kg/ha) et M2 (2700 kg/ha) appliquées dans 3 systèmes de culture. L'analyse statistique des rendements grain mesurés a été effectuée à l'aide du logiciel GenStat 12th Edition. Le modèle DSSAT 4.5 a permis de faire les simulations. Ainsi, une comparaison des rendements grain observés et ceux simulés a été réalisée. Les résultats de l'analyse statistique ont montré que les traitements R2F2M1 (2700R, 45N + 13.1P, 900M) et R2F2M2 (2700R, 45N + 13.1P, 2700M) donnent les meilleurs rendements grain par rapport au témoin R0F0M0, respectivement dans le système mil continu et les systèmes mil en rotation et en association avec le niébé sur la période 1998-2013. Cependant, malgré les faibles rendements enregistrés par le témoin, les résultats obtenus avec le modèle ont indiqué qu'il ne manifeste pas de stress hydrique, par contre son stress azoté est beaucoup plus important comparativement aux autres traitements. Nous en déduisons donc que la baisse de la fertilité du sol limite plus la production du mil que la pluviométrie. La baisse des rendements sous tous les traitements est liée principalement au stress hydrique qui intervient pendant les stades de floraison et surtout de remplissage des grains du mil. Les rendements grain ont été sous-estimés pour plusieurs années de la période 1998-2013 dû au fait que le modèle ne simule pas l'effet du phosphore qui est l'élément le plus limitant de la fertilité du sol et le plus important pour la culture du mil. Par ailleurs, la performance de prédiction du modèle a été en générale mauvaise pour certaines années de la période 1998-2013. Par contre, pour d'autres, elle a été acceptable. L'analyse biophysique sur la période 1983-2013 (31 ans) a montré que les combinaisons R2F0M0, et R2F0M0 et R2F0M1 présentent moins de risques vis-à-vis de la variabilité climatique respectivement dans les systèmes mil continu et en rotation avec le niébé, et dans le système mil en association avec le niébé. Cependant, l'analyse stratégique et financière a préconisé le traitement R0F2M0 comme la meilleure combinaison en termes de revenu monétaire et d'efficacité pour la production du mil dans les trois systèmes de culture sur la période 1983-2013.

Mots clés : mil, variabilité climatique, engrais minéraux, fumier, résidus de récolte, modèle DSSAT, Sahel, Niger.

Abstract

Pearl millet is the most consumed cereal in the Sahelian zone of Niger. The increase in productivity is greatly hampered by the low level of initial soil fertility and unfavorable climatic conditions. The overall objective of this study was to assess the impact of climate variability on the long-term effects of the combined application of manure, crop residues and mineral fertilizers on the productivity of millet in the Sahelian zone of Niger using historical agronomic and climatic data. Agronomic data come from the long-term trial conducted from 1998 to 2013 at the experimental station of the ICRISAT Sahelian Center (Sadoré, Niger). The experimental design was a split plot with 3 replications comparing 27 combinations of 3 millet residue levels coded R0 (300 kg / ha), R1 (900 kg / ha) and R2 (2700 kg / ha); 3 levels of mineral fertilizers coded F0 (0 kg N / ha + 0 kg P / ha), F1 (15 kg N / ha + 4.4 kg P / ha) and F2 (45 kg N / ha + 13.1 kg P / ha) and 3 levels of cattle manure coded M0 (300 kg / ha), M1 (900 kg / ha) and M2 (2700 kg / ha) applied in three cropping systems. Statistical analysis of the measured grain yields was performed using GenStat 12th Edition software. DSSAT 4.5 model has revealed the simulations. Thus, a comparison of the observed grain yields and those simulated was achieved. The results of the statistical analysis showed that R2F2M1 (2700R, 45N + 13.1P, 900M) and R2F2M2 (2700R, 45N + 13.1P, 2700M) treatments give the highest grain yields compared to control R0F0M0, respectively in the millet continuous system and millet in rotation and in combination with cowpea systems during the period 1998-2013. However, despite the low grain yields recorded by the control, the model indicated that it does not show water stress; but his nitrogen stress is more important compared to other treatments. We therefore conclude that the decline of soil fertility more limits millet production as rainfall. Lower yields in all treatments was mainly due to water stress that occurs during stages of millet flowering and especially grain filling. Grain yields were underestimated for several years in the period 1998-2013 due to the fact that the model does not simulate the phosphorus which is the most limiting factor of soil fertility and the most important for millet production. In addition, the prediction performance of the model was generally bad for several years in the period 1998-2013. By against, for others, it was acceptable. The biophysical analysis over the period 1983-2013 (31 years) showed that the combinations R2F0M0, and R2F0M0 and R2F0M1 less risk point of view climate variability respectively in millet continuous system, and millet in rotation with cowpea and millet in association with cowpea systems. However, strategic and financial analysis advocated R0F2M0 treatment as the best combination in terms of monetary returns and efficiency for millet production in the three cropping systems over the period 1983-2013.

Key words: millet, climate variability, fertilizer, manure, crop residues, DSSAT model, Sahel, Niger.

Introduction

La situation agricole et alimentaire de l’Afrique de l’Ouest est préoccupante au cours de ces 20 dernières années. Dans la région, l'augmentation de la production agricole peut être une force motrice pour soutenir la sécurité alimentaire, la dynamique démographique et la croissance économique. Cependant, dans la zone sahélienne, outre les nuisibles, la dégradation continue de la qualité des sols, les effets des phases de sécheresse et de l'irrégularité des pluies constituent les principales contraintes de l’agriculture avec pour conséquence la baisse du niveau de productivité des cultures (Sarr, 1975 ; Saïdou *et al.*, 2012). Au Niger, le mil [*Pennisetum glaucum* (L.) R.Br.], principal aliment de base des populations, domine dans les systèmes de production agricole et contribue à environ 75% à la production céréalière nationale (Ben Mohamed *et al.*, 2002). Les 50 dernières années ont été caractérisées par un faible taux de croissance de la production annuelle de mil par rapport au taux de croissance de la population humaine (Reardon *et al.*, 1997). Les rendements grains de mil sont faibles, généralement inférieurs à 500 kg/ha (De Rouw, 2004). L'augmentation annuelle de la production nationale totale de mil est mieux expliquée par l'expansion des terres cultivées plutôt que l'augmentation de la productivité. En plus des dégâts dus aux ravageurs, les faibles rendements de mil ont été attribués à trois principaux facteurs : (1) les précipitations annuelles limitées (300-600 mm), en tenant compte de la forte évapotranspiration potentielle annuelle (2000-2300 mm) associée à des périodes de sécheresse fréquentes et une forte variabilité interannuelle des précipitations (Sivakumar *et al.*, 1993) ; (2) la faible fertilité inhérente des sols (Bationo et Mokuwunye, 1991a), et (3) l'utilisation limitée d'intrants externes (Abdoulaye et Sanders, 2005). Beaucoup de recherches ont été entreprises pour améliorer ou tout simplement maintenir la fertilité des sols (Klaij et Ntare, 1995 ; Bationo *et al.*, 1998 ; Bationo et Buerkert, 2001), ainsi que pour améliorer l’efficacité d’utilisation de l'eau (Zaongo *et al.*, 1997 ; Payne, 2000), et des éléments nutritifs ou les deux (Bationo *et al.*, 1990b) en mettant l'accent sur l’utilisation du fumier, des résidus de récolte et des engrais minéraux, les principales sources potentielles de nutriments en zone sahélienne du Niger pour empêcher l’épuisement en éléments nutritifs, préserver la productivité à long terme des sols, et maximiser l’efficacité d'utilisation des nutriments. Cependant, l’extrapolation de ces résultats, et à priori leur utilisation par les agriculteurs est limitée, soit pour leur disponibilité (Palm *et al.*, 1997), soit pour leurs utilisations concurrentes (Bationo *et al.*, 1995 ; Lamers *et al.*, 1998), leurs prix ou les risques financiers élevés (Shapiro et Sanders, 1998) ou encore par le fait que la réponse du mil à ces pratiques de fertilité dépend fortement des propriétés des sols très variables dans l’espace ainsi que de la pluviométrie

annuelle et sa répartition intra-annuelle (Abdoulaye et Lowenberg-Deboer, 2000). Excepté les raisons susmentionnées (coût, disponibilité, variabilité de la fertilité des sols, etc.), la variabilité climatique est une préoccupation majeure apportant de nouveaux défis. En effet, des études ont démontré que la variabilité climatique a des impacts directs et indirects sur la production agricole (Badameli, 1996 ; Smith *et al.*, 1998 ; Lansigan *et al.*, 2000). Cette variabilité du climat est perçue à travers l'irrégularité des paramètres climatiques (précipitations, températures, humidité de l'air, insolation, etc.) dans leur évolution. La variabilité climatique au Niger se manifeste par l'occurrence d'évènements climatiques extrêmes et catastrophiques, comme les sécheresses et les inondations, qui peuvent faire des milliards de francs CFA en dommages (PANA Niger, 2006). La vulnérabilité des systèmes de culture à la variabilité climatique conduit à des risques économiques et d'insécurité alimentaire (Lansigan *et al.*, 2000 ; Jones, 2000). La variabilité climatique rend la production de mil incertaine. Les séquences sèches souvent présentes en début de saison causent des faux départs des cultures et entraînent des ressemis. Lorsque le ressemis est tardif, la saison des pluies peut se terminer avant la fin du cycle de la culture ; ce qui conduit souvent à des récoltes très médiocres, voire nulles. Les séquences sèches en milieu de saison stressent la plante et diminuent significativement sa croissance et son rendement final (Foxet Rogstrom, 2002). C'est l'une des principales raisons ayant conduit le Niger à enregistrer une année déficitaire sur deux, au cours des 50 dernières années (Haut-commissariat à l'initiative 3N, 2011). La variabilité climatique peut considérablement affecter le niveau de lessivage des nutriments et des pertes occasionnées par l'érosion (Saïdou *et al.*, 2003). Ainsi, il est bien connu que la réponse du mil à l'azote (N) par exemple est fortement dépendante des conditions climatiques, la plupart du temps de la quantité et de la distribution temporelle des précipitations et à la disponibilité d'autres nutriments tels que le phosphore (P) (Gandah *et al.*, 2003a). Ainsi, des recommandations d'application de 30 kg/ha à valeur unique de N pour la culture du mil, basées uniquement sur les résultats d'essais au cours d'un nombre limité d'années (Christianson *et al.*, 1990 ; Bationo *et al.*, 1992) pourraient ne pas être bien adaptées aux conditions sahéliennes où la variabilité temporelle des précipitations est très élevée. Une importante littérature existe aussi en ce qui concerne le fait que la recommandation 30 kg N/ha présente un risque économique élevé pour les petits agriculteurs en raison de contraintes climatiques, outre le fait qu'ils peuvent souvent ne pas avoir les moyens d'acheter ces quantités (Shapiro et Sanders, 1998 ; Abdoulaye et Lowenberg-Deboer, 2000 ; Abdoulaye et Sanders, 2005). En outre, plutôt que de chercher à maximiser les rendements, l'agriculture de subsistance à base de mil vise généralement à minimiser la variabilité interannuelle des rendements tout en essayant de garantir un certain rendement

minimal nécessaire pour couvrir les besoins alimentaires. Différentes approches peuvent être étudiés pour arriver à des recommandations plus appropriées qui puissent prendre en compte l'effet des facteurs climatiques parmi lesquelles les essais à long terme de réponse aux engrais (Rebafka *et al.*, 1994). Cette approche est, cependant, très coûteuse et de telles expérimentations sont extrêmement rares dans la région sahélienne. Pour lever cette limitation, les expérimentations à plus court terme peuvent être utilement complétées par des modèles de cultures correctement validés qui simulent les processus biophysiques les plus importants (dynamique de l'eau, de N et de P du sol et la croissance des cultures). Ces outils d'aide à la décision sont les plus appropriés pour étudier l'interaction entre la variabilité du climat, les décisions de gestion de la fertilité des sols et le rendement des cultures étant donné le coût élevé des essais à long terme et la longue période avant que les résultats soient disponibles pour un nombre suffisant de gamme de conditions météorologiques. Ces modèles sont largement utilisés pour mieux comprendre et appuyer la prise de décision dans les systèmes agricoles (Gijssman *et al.*, 2002 ; Jones *et al.*, 2003 ; Moeller *et al.*, 2007). Ils permettent d'économiser du temps et de l'argent et de capitaliser sur les résultats de recherche passée et sur les connaissances des agriculteurs autochtones. Ils peuvent donc utilement compléter la recherche expérimentale pour l'aide à la décision en ce qui concerne la gestion de la fertilité des sols dans diverses conditions d'alimentation hydrique. Ceci est particulièrement vrai dans le milieu sahélien caractérisé par la forte variabilité spatiale des propriétés du sol et la forte variabilité inter et intra-annuelle des précipitations. Ces modèles peuvent également être utilisés d'une manière prospective, conjointement avec les données sur le terrain pour formuler des recommandations mieux adaptées aux stratégies de minimisation des risques utilisés par les agriculteurs dans ces environnements. Jusqu'à présent, les études portant sur des modèles dynamiques applicables pour les systèmes de culture à base de mil à faibles intrants dans le Sahel sont rares et les résultats publiés mettent surtout l'accent sur le bilan hydrique. Le modèle DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology Transfer) est l'un des rares modèles dynamiques de croissance des cultures disponible et capable de prendre en compte l'eau et la dynamique N et de simuler différentes options de gestion de la fertilité (engrais minéraux et organiques) en intégrant des informations climatiques, des informations relatives à l'espèce végétale, des informations édaphiques et des informations relatives aux pratiques culturales en usage dans la région concernée. Le modèle peut prévoir adéquatement la biomasse et le rendement en grains du mil. Il permet de déterminer la part de chacun des éléments intervenant dans la production du mil, de comparer les données simulées à celles observées, et de détecter ainsi les anomalies dans les systèmes de production.

L'interprétation des résultats de ces simulations, comparés aux données mesurées permet également de dégager l'effet des facteurs climatiques.

Pour toutes les raisons mentionnées ci-dessus, le modèle DSSAT semble très approprié pour la modélisation de la réponse mil au climat et à la gestion de la fertilité des sols dans l'environnement sahélien. Cependant, une condition nécessaire est de confirmer la pertinence du modèle à travers un bon calage et validation des variétés de mil dans les conditions agroclimatiques de la zone sahélienne du Niger.

La présente étude s'inscrit dans le cadre d'une meilleure valorisation des stratégies de gestion à long terme de la fertilité des sols combinant fumier, résidus de récolte et engrais minéraux dans les systèmes de culture à base de mil en zone sahélienne du Niger en utilisant des données météorologiques historiques.

Les questions abordées dans cette étude sont les suivantes :

- le modèle DSSAT est-il performant pour évaluer la réponse du mil à la variabilité climatique sous trois principales pratiques de gestion à long terme de la fertilité du sol (fumier, résidus de récolte et engrais minéraux) en zone sahélienne du Niger ?
- la variabilité climatique a-t-elle un impact sur les effets à long terme de l'application combinée du fumier, des résidus de récolte et des engrais minéraux sur la productivité du mil en zone sahélienne du Niger ?
- le niveau de fertilité du sol peut-il être un élément de contrôle des effets des facteurs climatiques sur la productivité du mil en zone sahélienne du Niger ?

En rapport avec ces questions, nous avons formulé les hypothèses suivantes :

- le modèle DSSAT est performant pour évaluer la réponse du mil à la variabilité climatique sous trois principales pratiques de gestion à long terme de la fertilité du sol (fumier, résidus de récoltes et engrais minéraux) en zone sahélienne du Niger ;
- la variabilité climatique a un impact sur les effets à long terme de l'application combinée du fumier, des résidus de récolte et des engrais minéraux sur la productivité du mil en zone sahélienne du Niger ;
- le niveau de fertilité du sol est un élément de contrôle des effets des facteurs climatiques sur la productivité du mil en zone sahélienne du Niger.

L'objectif global de cette étude est d'évaluer l'impact de la variabilité climatique sur les effets à long terme de l'application combinée du fumier, des résidus de récolte et des engrais minéraux sur la productivité du mil en zone sahélienne du Niger.

De façon spécifique, il s'agit de :

- évaluer la performance du modèle DSSAT en termes de réponse du mil à la variabilité climatique sous trois principales pratiques de gestion à long terme de la fertilité du sol (fumier, résidus de récolte et engrais minéraux) en zone sahélienne du Niger ;
- évaluer les effets des paramètres climatiques (précipitations, températures, radiation solaire) sur la productivité du mil ;
- évaluer la part de la fertilité du sol dans le contrôle des facteurs climatiques sur la productivité du mil.

Le présent mémoire, issu de ce stage, est structuré en quatre chapitres : le premier chapitre est consacré à la revue de la littérature ; le deuxième chapitre décrit le matériel et les méthodes utilisés ; dans le troisième chapitre, les résultats sont présentés ; le quatrième chapitre est consacré à la discussion des résultats obtenus. Une conclusion est tirée et des recommandations sont formulées.

Chapitre 1 : Revue de littérature

1.1. Contraintes majeures affectant la production du mil au Sahel

Dans les pays sahéliens, de nombreuses contraintes ont été identifiées comme facteurs de limitation de la production agricole. Il est nécessaire d'identifier et d'hierarchiser au préalable les causes de variation de la production afin de dégager les priorités pour son amélioration.

1.1.1. Contraintes liées au climat

La variabilité climatique a des impacts directs et indirects sur la production agricole (Badameli, 1996 ; Smith *et al.*, 1998 ; Lansigan *et al.*, 2000). Cette variabilité est souvent prévisible ou connu à l'avance. Elle se définit comme étant la variation de l'état moyen du climat à des échelles temporelles et spatiales. Autrement dit, c'est la variation naturelle intra et interannuelle du climat. Elle est une caractéristique inhérente du climat qui se manifeste par les différences entre les statistiques de long terme des éléments climatiques (pluie, température, humidité, durée des saisons, etc.) calculées pour des périodes différentes. Selon Seidou *et al.* (2012), la variabilité climatique se définit comme l'occurrence de déviations aléatoires des variables climatiques (comme la précipitation ou la température) par rapport à leurs valeurs moyennes ou médianes. Lorsque par contre ces déviations sont très marquées, le climat est souvent radicalement différent entre deux années consécutives et se caractérise généralement par des événements extrêmes.

La variabilité du climat est perçue à travers l'irrégularité des paramètres climatiques dans leur évolution. Au Niger, elle se manifeste par l'occurrence d'évènements climatiques extrêmes et catastrophiques, comme les sécheresses et les inondations, qui peuvent faire des milliards de francs CFA en dommages (PANA Niger, 2006).

Une relation étroite entre la diminution des précipitations au Sahel et la réduction du nombre de jours de pluie a été confirmée par Le Barbé et Lebel (1997). Ils ont observé une diminution à la fois de la quantité de pluie saisonnière et du nombre d'évènements de précipitations de l'ordre de 25%. La variabilité mensuelle des précipitations est plus nette depuis que les précipitations se produisent uniquement pendant les 3 à 5 mois de la saison pluvieuse. La variabilité journalière est plus cruciale pour l'agriculture. La durée moyenne entre les événements de pluie successifs diminue progressivement pendant la saison des pluies de 6 à 2 jours. La moyenne maximale par jour de pluie en juillet et août sont 45 mm/jour et 48 mm/jour respectivement (Sivakumar *et al.*, 1993).

Au Niger, le climat se caractérise par l'opposition entre une saison de pluies dont la durée varie de 3 à 5 mois et une saison entièrement sèche le reste de l'année (Sivakumar 1995, cité par

ICRISAT 1996). La pluviométrie annuelle oscille entre 200 et 1300 mm avec un gradient croissant en allant du Nord vers le Sud (Nicou, 1986). La distribution des pluies est unimodale (Papa, 1986). L'extrême irrégularité des précipitations fait que la saison des pluies est souvent une succession de périodes pluvieuses et de périodes sèches, ces dernières devenant de plus en plus fréquentes à mesure que l'on va vers les pluviométries les plus basses (Nicou, 1986). Par ailleurs, elles se présentent sous forme d'orages très intenses et peuvent créer des phénomènes d'engorgement superficiel. Cette pluviométrie aléatoire pendant la période végétative a une incidence sur le potentiel agricole, d'autant plus que la demande évaporative atmosphérique reste toujours élevée (Lamine, 1986). L'évapotranspiration potentielle annuelle est de 2000 - 2300 mm/an (Sivakumar *et al.*, 1993).

En effet, c'est la pluie qui détermine essentiellement les rendements et conditionne l'efficacité des intrants (engrais, pesticides...) (Pieri, 1986). Depuis plus de deux décennies, les pays sahéliens enregistrent un déficit chronique au niveau de la pluviométrie, aggravé par une mauvaise répartition de celle-ci. Les cultures sont très affectées et produisent bien en deçà de leur potentiel (Papa, 1986).

La variabilité climatique implique des risques et incertitudes importants qui expliquent les échecs des démarches d'intensification agricole classiques, à savoir l'utilisation de variétés modernes plus productives ou l'usage des engrais (De Rouw, 2004 ; Hansen, 2005).

Elle rend la production de mil incertaine. Les séquences sèches souvent présentes en début de saison causent des faux départs des cultures et entraînent des ressemis. Lorsque le ressemis est tardif, la saison des pluies peut se terminer avant la fin du cycle de la culture ; ce qui conduit souvent à des récoltes très médiocres, voire nulles. Les séquences sèches en milieu de saison stressent la plante et diminuent significativement sa croissance et son rendement final (Foxet Rogstrom, 2002). C'est l'une des principales raisons ayant conduit le Niger à enregistrer une année déficitaire sur deux, au cours des 50 dernières années (Haut-commissariat à l'initiative 3N, 2011).

1.1.2. Contraintes liées à la fertilité des sols

Beaucoup de sols de la zone semi-aride en général sont très pauvres en éléments minéraux ou souffrent de carences spécifiques (phosphore) qui entravent la croissance des cultures (Bationo, 1986). Une grande variabilité a été signalée sur de courtes distances (2 m) (Voortman *et al.*, 2004).

1.2. Pratiques de gestion de la fertilité des sols

Dans cette partie, nous faisons un bref aperçu sur les aspects de gestion à long terme de la fertilité du sol utilisant les engrais minéraux, le fumier et les résidus de récolte, appliqués seuls ou en combinaison.

1.2.1. Résidus de récolte

Les résidus de récolte ont reçu beaucoup d'attention scientifique. Leur application à court terme, mais surtout à long terme augmente les rendements de mil alors que leur omission induit immédiatement une baisse de rendement. Les mécanismes responsables des effets positifs des résidus de récolte sur la culture sont physiques et chimiques. Les effets physiques de l'application de résidus de récolte comprennent : la réduction de la perte en éléments nutritifs par l'érosion éolienne et hydrique (Buerkert *et al.*, 2000 ; Biielders *et al.*, 2002) ; la réduction de la formation des croûtes de surface ; la formation accrue d'agrégats stables améliorant la porosité du sol et l'infiltration de l'eau (Buerkert et Stern, 1995), et une diminution de la température de surface du sol (Buerkert et Lamers, 1999 ; Buerkert *et al.*, 2000). Les effets chimiques du paillage sont liés à l'augmentation de la teneur en bases échangeables et de la C.E.C, la baisse de la saturation en Aluminium, et de la mobilité du phosphore (Bationo *et al.*, 1993), l'augmentation de la disponibilité en P et K, et leur fourniture lente pour les plantes (Schlecht et Buerkert, 2004).

Les quantités de résidus de récolte généralement recommandées suite aux essais agronomiques sur le mulching sont de l'ordre de 2000 kg de résidus de récolte par hectare (Bationo *et al.*, 2000). Les limites de cette technologie se situent au niveau de ce que les champs produisent réellement. Bationo *et al.* (2000) rapportent dans une étude à Dantiandou, que sur 1200 kg/ha de paille de mil produits à la fin de la saison de croissance, seulement 250 kg/ha étaient encore disponibles en début de saison des pluies l'année suivante pour la pratique du mulching. Environ 50 % de la disparition peut être attribuée au pâturage par les animaux et les 50 % restants sont utilisés dans la construction, comme combustible, vendus ou utilisés pour le mulching. De plus, le problème du transport des résidus, avant et après leurs transformations (compostage) apparaît comme une composante essentielle qui limite les plans de restitutions organiques (Berger, 1990).

1.2.2. Engrais minéraux

Les systèmes de production à base de mil au Sahel sont caractérisés par peu ou pas d'entrées d'engrais minéraux. Les agriculteurs mélangent souvent de petites quantités d'engrais avec les semences au moment du semis.

En raison de la faible disponibilité des résidus de récolte et du fumier au Sahel, beaucoup d'attention a été accordée par la recherche à l'utilisation des engrais minéraux afin d'alléger les contraintes de fertilité du sol.

Bationo (1986) a montré que l'application de phosphore est susceptible d'augmenter de 3 à 4 fois le rendement du mil. Des rendements de 790 à 1420 kg/ha ont été obtenus avec 45 kg P₂O₅/ha par Mahaman (1989) ; la réponse est d'autant plus importante que l'apport est effectué en poquets. Le mil répond aussi très bien aux engrais azotés. Cette réponse du mil est fortement corrélée avec la pluviométrie (Bationo *et al.*, 1995). Ainsi, l'efficacité de l'azote est de 15 kg de grain de mil obtenu par kilogramme d'azote à la dose de 30 kg N/ha lorsque la pluviométrie est bonne. Par contre, lorsqu'elle est mauvaise, on n'observe pas d'effets significatifs. De plus, il n'y a pas de réponse positive à N sans une fourniture adéquate de P (Buerkert *et al.*, 2001). Ces résultats traduisent l'importance de l'application des engrais. Cependant, leur utilisation est très limitée dans la région sahélienne malgré les importants gisements qui existent. Cela est dû aux incertitudes de la pluviométrie, le coût élevé des engrais par rapport au faible niveau de revenus des paysans, l'inefficacité des systèmes d'approvisionnement et de distribution (Mokwunye *et al.*, 1995). En plus de ces contraintes, les engrais ont un effet néfaste, celui de perturber la vie dans le sol, entraîner une acidification (toxicité en aluminium), un épuisement en oligo-éléments lorsqu'ils sont utilisés en continu sur une longue durée (Reijntjes *et al.*, 1995). En conséquence, les systèmes de production agricoles ne sauraient être maintenus de façon durable dans ces conditions (Bationo et Mokwunye, 1991b). Pour améliorer la durabilité des systèmes de production de la zone sahélienne, il est indispensable de conjuguer les effets complémentaires des engrais minéraux au recyclage des résidus organiques (fumier, résidus de culture) (Bationo et Mokwunye, 1991b ; Pichot *et al.*, 1981).

1.2.3. Fumier

Le fumier est le pilier essentiel de la plupart des stratégies de gestion traditionnelle de la fertilité des sols au Sahel (Schlecht *et al.*, 2004 ; Ooyama, 2005).

Le fumier a reçu beaucoup d'attention scientifique. Des taux d'application allant de 2,5 à 2,8 t/ha ont été largement recommandés par la recherche. Les effets bénéfiques du fumier résident dans l'augmentation de la porosité du sol, de la stabilité des agrégats, de la matière organique du sol (MOS), de l'infiltration et de la capacité de rétention de l'eau, de la diminution des pertes des sols éoliens, l'amélioration de la C.E.C, de la disponibilité des éléments nutritifs et du pH des sols fortement sableux de la région sahélienne (Schlecht *et al.*, 2004 ; Bationo *et al.*, 2007).

Des essais en station ont montré que l'effet résiduel du fumier était encore importante trois années après l'application (Schlecht *et al.*, 2004). Cette stratégie visant à accroître l'efficacité des éléments nutritifs est bien connue des agriculteurs, mais elle est limitée à cause de la faible disponibilité du fumier (Harris, 2002).

Les recommandations ne tiennent pas compte de la qualité très variable de fumier et des conditions pluviométriques. Une technique de gestion alternative consiste à diminuer les taux d'application pour augmenter l'aire traitée, et donc augmenter les rendements sur une plus grande superficie tout en réduisant le risque de lessivage d'éléments (si la pluviométrie est importante) et les dommages causés aux cultures en cas de pluviométrie faible et de surdosage de la fumure (Gandah *et al.*, 2003). Esse *et al.* (2001) conseillent d'adapter les taux d'application de fumier selon la pluviométrie, la présence de termites et le type de pratique (parcage/fumier transporté).

1.2.4. Engrais minéraux combinés aux engrais organiques

Pour redresser les bilans négatifs en nutriments il faut développer des systèmes de gestion intégrée de ces nutriments, c'est-à-dire manipuler judicieusement les processus d'entrée et de sortie des nutriments. Tous les exemples montrent que même si l'application des engrais minéraux est un bon moyen d'augmenter les rendements, ils ne peuvent pas seuls soutenir ces rendements à long terme. D'autre part, les techniques qui recyclent les nutriments ne permettent pas de compenser seules les pertes liées à l'exportation de la récolte. Une production durable pourra être obtenue lorsque les engrais minéraux sont combinés avec d'autres technologies comme l'application de résidus de culture ou de fumier (Bationo *et al.*, 1998). Une approche intégrée de gestion des éléments nutritifs (INM) reposant sur l'utilisation de plusieurs sources de nutriments (divers engrais organiques et minéraux) est une nécessité afin d'atteindre des systèmes agricoles productifs et durables (Kimani *et al.*, 2003). Les effets additifs, mais aussi synergiques (plus que proportionnelle) ont été rapportés dans la littérature à la suite de l'utilisation combinée des engrais organiques et minéraux (Bationo *et al.*, 1993 ; Kimetu *et al.*, 2004). Lorsque les engrais sont combinés avec des sources de matières organiques telles que les résidus de culture, le fumier, les rendements du mil qui en résultent sont fortement accrus (Mokwunye et Bationo, 1991). Bationo (1991) a rapporté des résultats obtenus en 1970 dans un essai conduit à Saria (Burkina Faso). Ils montrent que l'association des résidus de culture avec les engrais a augmenté le rendement du mil de 1532 kg/ha, par rapport aux engrais seuls (816 kg/ha) et aux résidus seuls aussi (743 kg/ha), tandis que le témoin ne faisait que 56 kg/ha. Buerkert (1992) a obtenu un accroissement du rendement du mil à 89,42% avec des résidus de

culture (2000 kg/ha) et de phosphore (13 kg/ha P). Des résultats similaires ont été obtenus par Diouf (1990). De plus, l'application localisée d'engrais minéral au poquet lors du semis du mil couplée avec l'adoption de systèmes culturaux adaptés comme l'association avec le niébé permet d'obtenir de bonnes augmentations en biomasse totale (Bationo *et al.*, 2000). Les effets synergiques peuvent résulter des effets secondaires de l'utilisation des engrais organiques, en plus de leur rôle de fournisseur de nutriments : amélioration de la mobilité de P, diminution de Al échangeable, amélioration de la croissance des racines, diminution de la température de surface et de la résistance à la pénétration dans le sol, et la protection des sols contre l'érosion éolienne (Buerkert *et al.*, 2000). Un effet spécifique de la gestion intégrée de la fertilité du sol est également de maximiser l'efficacité d'utilisation des nutriments (Kimani *et al.*, 2003). Dans les systèmes d'agriculture pluviale à base de mil, cela va de pair avec une forte augmentation de l'efficacité d'utilisation de l'eau (Payne, 2000). Alors que les engrais minéraux libèrent leurs éléments nutritifs assez rapidement, le fumier ou les résidus agissent comme des engrais à libération lente. De plus, ils constituent une source de substances nutritives multiples, y compris les micronutriments, l'approvisionnement en carbone pour les microorganismes impliqués dans le cycle des éléments nutritifs, et peuvent améliorer la qualité physique et chimique des sols (Buerkert *et al.*, 2000 ; Esse *et al.*, 2001 ; Harris, 2002). L'utilisation des résidus de récolte ou du fumier peut tamponner l'acidification des sols résultant de l'utilisation d'engrais minéraux, ce qui renforce l'efficacité d'utilisation des engrais en empêchant l'immobilisation de P (Hafner *et al.*, 1993b). En conclusion, il ressort que les sols de la zone sahélienne sont très pauvres du point de vue fertilité pour assurer une production agricole durable. Il faut restaurer et améliorer la fertilité des sols pour assurer une production agricole durable.

Les pratiques traditionnelles de restauration de la fertilité sont insuffisantes ; les problèmes de toxicité liés à l'utilisation en continu à long terme des engrais, les systèmes d'approvisionnement et de distribution des engrais inadéquats limitent très souvent leur utilisation. Cependant, les résultats de la recherche montrent que les marges d'amélioration de la productivité des sols existent. Il reste seulement de jouer sur la complémentarité entre les engrais minéraux et la matière organique pour permettre une durabilité agro - écologique des systèmes de production sahéliens. Cependant, les sources de matière organique sont peu abondantes en raison des effectifs limités des troupeaux nécessaires pour assurer le transfert de fertilité, des usages multiples dont sont objets les résidus.

En conséquence, les applications de fumure organique sont très faibles et espacées dans le temps et s'effectuent seulement sur les champs de petites superficies proches des habitations, ou sur les parcelles réservées aux cultures maraîchères (Joly, 1987).

Les champs éloignés en reçoivent peu en raison du travail et l'énergie qu'ils exigent pour le transport (Reijntjes *et al.*, 1995).

1.3. Approche de modélisation

1.3.1. Outils d'aide à la décision en Agriculture

Dans la plupart des domaines de recherche, la modélisation est devenue une approche privilégiée pour décrire des systèmes complexes pour prédire, évaluer des risques ou aider à la décision. Les outils d'aide à la décision (OAD) sont des systèmes informatiques (modèles) conçus pour assister l'utilisateur dans la résolution de problèmes complexes et aider dans la prise de décisions particulières (Newman *et al.*, 1999). Ils offrent les possibilités d'explorer le futur et pourvoient une base de référence. Cependant, en raison de leurs limites (voir plus loin), les OAD doivent être employés avec précaution et il est important de garder à l'esprit qu'ils ne peuvent suppléer l'activité de prise de décision ; ils constituent juste une aide pour orienter la prise de décision (Lamboni, 2003).

La modélisation est donc l'activité qui consiste à convertir un système réel défini en un modèle représentant ce système réel (Dzotsi, 2002). Selon Diebolt (2006), la modélisation comme une opération par laquelle on établit un modèle d'un phénomène afin d'en proposer une représentation interprétable, reproductible et simulable. Sissoko et Coulibaly (1998) la définit comme le meilleur outil permettant de faire des analyses intégrant le maximum de variables et de paramètres techniques et socio-économiques pour une meilleure orientation de la gestion des ressources naturelles et des options de développement d'une manière générale.

Un système est un ensemble d'éléments inter-agissants en harmonie de telle sorte qu'une affectation d'un élément entraîne un changement conséquent du comportement de l'ensemble (Jones et Luyten, 1998). Il est circonscrit dans le temps et dans l'espace et ses limites sont voulues par le concepteur suivant l'objectif visé en vue d'étudier une partie du monde réel (Jones et Luyten, 1998).

L'approche système est une méthode de recherche souvent interdisciplinaire, qui demande la perception d'un sujet (un problème) de manière globale comme un système afin de mieux l'étudier (Struif-Bontkes, 2001).

Pour étudier une problématique, par exemple la fertilité d'un sol pour une culture donnée, on peut définir le système sol-plante et circonscrire les limites de ce système. On étudiera alors toutes les actions au sein du système défini et les facteurs qui agissent sur ce système.

Plusieurs définitions ont été attribuées au mot modèle selon le contexte, néanmoins, dans le domaine agricole, il demeure un outil qui intègre les connaissances acquises sur les systèmes

agricoles en imitant les phénomènes du monde réel de telle sorte qu'il permet de comprendre des situations complexes et de faire des prévisions. Il permet de décrire et de comprendre un système donné. Selon Jones et Luyten (1998) et Dzotsi (2002), le modèle est une représentation statique ou dynamique, subjective, simplifiée et sélective de la réalité faisant intervenir des formules mathématiques pour définir les relations entre certains éléments. Il ne peut donc avoir la prétention de représenter parfaitement la réalité puisqu'il n'est issu que de la connaissance que son concepteur possède de cette réalité et du but que celui-ci poursuit. Ils peuvent permettre aussi de fournir rapidement des solutions de rechange faites sur mesure pour la gestion des cultures et du sol dans un environnement particulier. Ils sont très appropriés pour être employés dans le développement et la diffusion participative des options de Gestion Intégrée de la Fertilité des Sols (GIFS) (Struif-bontkes *et al.*, 2003).

Les modèles peuvent être subdivisés en 2 principaux groupes, à savoir les modèles empiriques et les modèles mécanistes parmi lesquels, on distingue les modèles de simulation des cultures qui sont plus complexes car ils tiennent compte du fonctionnement de la plante, en particulier jusque dans l'élaboration du rendement.

1.3.2. Modèles de simulation des cultures

Les modèles de simulation des cultures, aussi appelés modèles écophysiologiques, sont des outils mathématiques et informatiques qui simulent le fonctionnement dynamique d'une culture (système sol-plante) en interaction avec le climat et les pratiques agricoles. Le modèle de simulation est la représentation schématique d'une conception de système. Ils ont été développés depuis une quarantaine d'années. Leur naissance correspond à une valorisation des travaux sur la photosynthèse et la respiration (De Wit *et al.*, 1970) avec une mise en relation entre la biomasse accumulée et les processus instantanés. Ces modèles intègrent la plupart des processus physiologiques qui sont mis en jeu dans la chaîne de production végétale. Ils sont constitués d'un ensemble de relations mathématiques décrivant le fonctionnement du système sol-plantes en interaction avec le climat et les opérations techniques. Pour ces raisons, les modèles de culture sont aussi appelés modèles biophysiques ou encore modèles biotechniques. Ils permettent d'estimer, sur la base des conditions climatiques de la campagne, les rendements, et ce dès le début des récoltes, voire au cours de la campagne agricole (Samba *et al.*, 2001).

Les équations mathématiques, appelées formalismes, sont constituées de variables d'état qui caractérisent l'état du système à différents pas de temps, et de paramètres, qui constituent les constantes des équations mathématiques utilisées (Jones et Luyten, 1988).

Les variables d'entrées décrivent les conditions du système, tels que les états initiaux du sol, la météorologie journalière (rayonnement global, températures minimales et maximales, pluviométrie) et l'itinéraire technique. Les paramètres sont relatifs à des propriétés intrinsèques du système et ils gèrent les relations entre ses variables d'état. Leur valeur ne change pas durant les simulations. Les variables d'états (ou exploratoires) décrivent l'évolution du système au cours du temps. Les variables de sorties constituent les résultats de la simulation, intermédiaires ou finaux. Une caractéristique majeure de ces modèles est leur structure élaborée et leur formulation mathématique plus ou moins complexe. Ils ont l'avantage de permettre de faire des simulations souvent difficiles à réaliser expérimentalement. De ce fait, ils sont utilisés comme des outils de recherche. Le principal inconvénient de ces modèles est la difficulté de leur validation (Brisson, 2009). Ces modèles gèrent au pas de temps journalier un développement du couvert reposant sur le fonctionnement carboné des plantes. Le rayonnement intercepté est transformé en biomasse qui, selon les choix de représentation du système, est répartie dans différents types d'organes. Cette répartition des assimilats repose sur des proportions préétablies en fonction des stades de développement ou sur des équilibres « sources–puits ». Dans tous les modèles de culture, c'est le flux de matière carbonée qui pilote le fonctionnement trophique de la plante. Il est accompagné, dans certains cas, d'un flux d'azote pouvant également être soumis à une loi de répartition entre organes. L'essentiel des autres processus est introduit dans les modèles comme des flux d'information servant à orienter, modifier ou limiter le flux de carbone (Brisson, 2009). Il existe une multitude de modèles de simulation des cultures dont le modèle DSSAT (*Decision Support System for Agrotechnology Transfer*).

Le modèle DSSAT a subi des tests et applications dans les zones Semi-Arides de l'Afrique de l'Ouest. Jagtap *et al.* (1999) décrivent les décisions d'applications dans un environnement plus subhumide au Nigeria. Thornton *et al.* (1997) ont développé un prototype basé sur un SIG, un système de prévision en temps réel des rendements pour le Burkina Faso qui utilise CERES-Millet et les précipitations obtenues par satellite combinées avec des séries de données météorologiques historiques. Dans une expérience à Tara (Niger), CERES-Millet a sensiblement prédit l'indice de surface foliaire, la biomasse, le rendement grain et la teneur en eau du sol (Fechter *et al.*, 1991).

Les modèles inclus dans DSSAT (y compris leurs prédécesseurs) ont été utilisés dans plusieurs régions et pour une large gamme d'applications que toute autre famille de modèles de cultures.

Chapitre 2 : Matériel et Méthodes

2.1. Présentation du site d'étude

2.1.1. Situation géographique

L'étude a été menée au niveau de la station expérimentale du Centre Sahélien de l'Institut international de recherche sur les cultures des zones tropicales semi-arides, situé à Sadoré à environ 45 km au Sud-Ouest de Niamey, la capitale du Niger. Ses coordonnées géographiques sont les suivantes : 2° 17' de longitude Est ; 13° 14' de latitude Nord ; 231 m d'altitude (figure 1). Le Centre Sahélien de l'ICRISAT (C.S.I) s'étend sur une superficie de 500 ha.

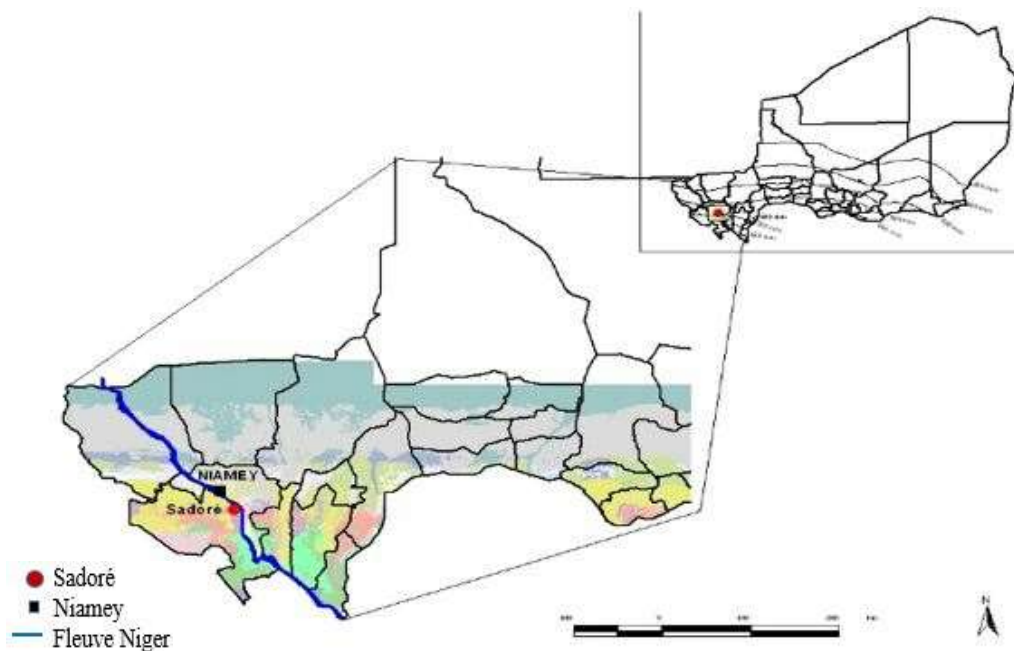


Figure 1 : Localisation géographique du Centre Sahélien de l'ICRISAT de Sadoré

2.1.2. Climat et végétation

Le climat est typique de la zone sahélienne du Niger (isohyètes 400 et 600 mm) caractérisé par l'alternance de deux saisons fortement contrastées : la saison des pluies ou hivernage qui s'étend généralement de mai à octobre et la saison sèche qui couvre le reste de l'année.

La pluviométrie moyenne annuelle est de 560 mm et le régime pluvial se caractérise par une variabilité importante aussi bien dans le temps que dans l'espace, influençant négativement la production agricole (ICRISAT/rapport annuel, 1981). Les températures sont élevées tout au long de l'année et la moyenne se situe autour de 29 °C. L'évapotranspiration est de 2000 mm par an en moyenne.

Au cours de la période 1983-2013, la pluviométrie moyenne annuelle a varié de 260,2 mm en 1984 à 793,8 mm en 1994 sur 32 à 52 jours de pluie respectivement avec une moyenne interannuelle de 554,1 mm (figure 2).

Les températures de l'air du C.S.I présentent de grandes variations saisonnières. On a noté au cours des 31 dernières années, une légère augmentation des températures moyennes. Elles ont varié de 28,3 °C en 1983 à 31,7 °C en 1986 avec une moyenne de 29,4 °C. Les températures minimales et maximales ont oscillé, respectivement de 21,3 °C et 35,2 °C en 1983 à 23,0 °C et 40,6 °C en 2010 et 1986 avec des moyennes de 22,2 °C et 36,5 °C.

La radiation solaire moyenne annuelle était comprise entre 16,9 MJ/m²/j en 1988 et 24,7 MJ/m²/j en 2008 avec une moyenne de 22,0 MJ/m²/j.

La vitesse annuelle du vent était de 4,8 m/s en moyenne et l'humidité relative moyenne annuelle, de 29,6% sur la période 1983-2013.

La végétation naturelle du C.S.I est composée de la brousse tigrée à dominance de *Guiera senegalensis*, *Combretum glutinosum* ; la savane arborée à dominance d'espèces comme *Acacia nilotica*, *Balanites aegyptiaca*, *Zizyphus mauritiana*, *Faidherbia albida*, et la savane herbacée qui est dominée par des espèces comme *Andropogon gayanus*, *Cenchrus biflorus*, *Eragrostis tremula*, etc. (ICRISAT/rapport annuel, 1981). Les principales cultures sont le mil, le niébé et l'arachide.

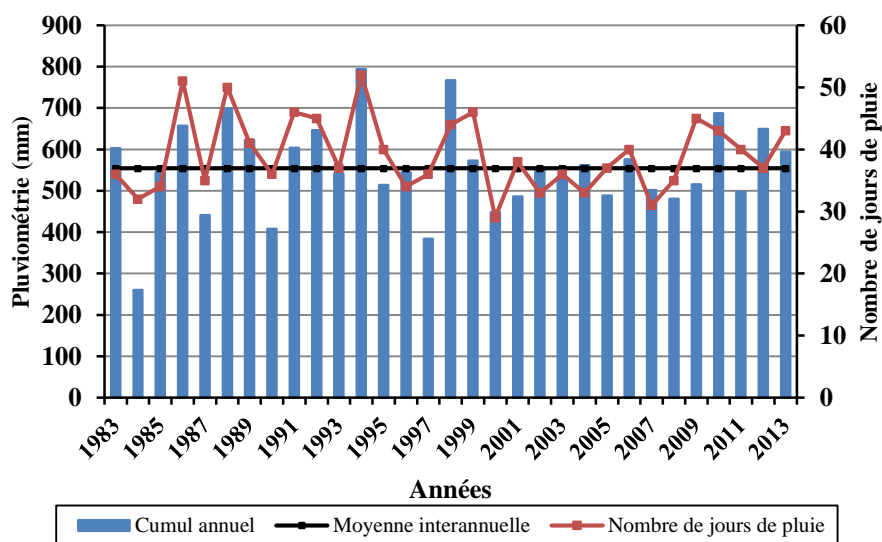


Figure 2 : Pluviométrie annuelle et nombre de jours de pluie du C.S.I (1983-2013)

2.1.3. Sols

Les sols du C.S.I sont sableux, siliceux, isohyperthermiques (*Psammentic Paleustatifs*) avec plus de 90 % de sable dans l'horizon A et de bonnes propriétés de drainage et de perméabilité. Ils sont rougeâtres et pauvres en argile et en matière organique ; ce qui explique leur faible Capacité d'Echange Cationique (C.E.C) qui varie de 0,6 à 3,2 méq pour 100 g de sol (West *et al.*, 1984 ; Sivakumar et Abdoussalam, 1994). Ce sont des sols acides (pH = 5,7) et déficients en azote et en phosphore. Sans protection efficace, ils sont sujets à l'érosion (ICRISAT/rapport annuel, 1981).

2.2. Données expérimentales

2.2.1. Dispositif expérimental

Cette étude capitalise les données de recherche passée sur un essai à long terme qui a débuté depuis la saison pluvieuse (sans irrigation) de 1998 jusqu'en 2013 sur la parcelle 8A du plan d'organisation de la station expérimentale du C.S.I. L'objectif était d'évaluer les effets à long terme de l'application combinée du fumier de bovin, des résidus de récolte et des engrais minéraux sur la productivité de mil en zone sahélienne du Niger.

Le dispositif expérimental utilisé était un split plot (parcelles subdivisées) de 3 facteurs à 3 niveaux chacun avec 3 répétitions. Ces facteurs et niveaux de facteurs sont les suivants :

1. application uniforme des résidus de mil noté R0, R1 et R2 ;
2. application uniforme du fumier de bovin noté M0, M1 et M2 ;
3. application d'engrais minéral apportant de l'azote et du phosphore noté F0, F1 et F2.

Les traitements constitués par la combinaison des niveaux des facteurs étudiés étaient les suivants : R0F0M0, R0F0M1, R0F0M2, R0F1M0, R0F1M1, R0F1M2, R0F2M0, R0F2M1, R0F2M2, R1F0M0, R1F0M1, R1F0M2, R1F1M0, R1F1M1, R1F1M2, R1F2M0, R1F2M1, R1F2M2, R2F0M0, R2F0M1, R2F0M2, R2F1M0, R2F1M1, R2F1M2, R2F2M0, R2F2M1, R2F2M2 (figure 3).

Les doses de fertilisants apportées par hectare sont rapportées dans le tableau 1. Les caractéristiques chimiques du fumier de bovin et des résidus de mil sont présentées respectivement dans les tableaux I et II.

La superficie de chaque parcelle principale était de 10 x 20 m, soit 200 m² et celle de chaque sous-parcelle était de 5 m x 10 m, soit 50 m².

Des allées de 2 m et 1 m séparent respectivement les blocs et les parcelles élémentaires. La superficie totale du dispositif expérimental était de 1,62 ha.

Les sous-parcelles étaient occupées par les systèmes de culture suivants : le mil continu (culture pure), le mil en rotation avec le niébé, et le mil en association avec le niébé.

Tableau I : Quantités de résidus de mil, d'engrais minéraux et de fumier apportés

Niveau d'application	Dose apportée (kg/ha)		
	0	1	2
Résidus de récolte (R)	300	900	2700
Engrais minéral (F)	0N+0P	15N + 4,4P	45N + 13,1P
Fumier de bovin (M)	300	900	2700

N.B : R = pearl millet Residue, F = Fertilizer, M = cattle Manure

Tableau II : Composition chimique du fumier de bovin et des résidus de mil

	N total (%)	P total (%)	K total (%)
Fumier de bovin	1,52	0,20	1,31
Résidus de mil	0,71	0,03	1,77

Source : Laboratoire des sols du C.S.I

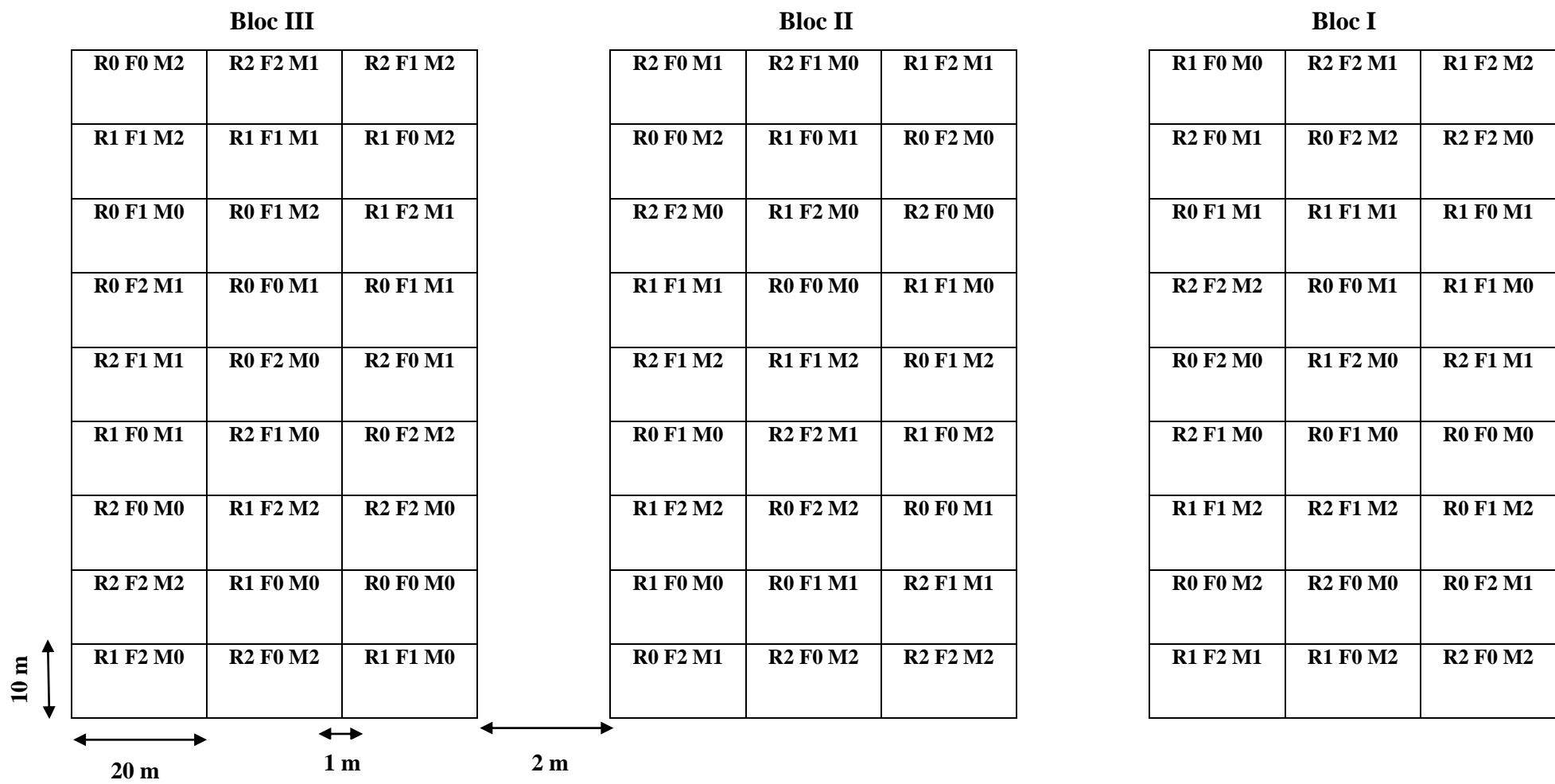


Figure 3 : Plan de masse de l'essai d'évaluation des effets à long terme de l'application combinée du fumier de bovin, des résidus de récolte et des engrais minéraux sur la productivité de mil en zone sahélienne (Centre Sahélien de l'ICRISAT, Sadoré, Niger)

2.2.2. Conduite de l'essai

La parcelle d'essai a été utilisée en 1997 par le Programme Agroclimatologie du C.S.I pour un essai d'homogénéité sans labour et sans intrants. Le précédent cultural était du mil en culture pure. Avant cela, elle était en jachère de plus de 10 ans.

Avant la mise en place de l'essai, le sol a été échantillonné à 0-20 cm et 20-40 cm (annexe I). En 2005, des échantillons de sol ont été également prélevés aux profondeurs 0-10 cm, 10-20 cm, 20-40 cm et 40-60 cm et analysés au Laboratoire des sols du C.S.I (annexe II).

Le matériel végétal utilisé était composé de la variété CIVT (Composite Inter-Variétal de Tarna) de mil [*Pennisetum glaucum* (L.) R.Br.], sélectionnée par l'Institut National de Recherche Agronomique du Niger (INRAN-Niger, 2012). C'est une variété de mil précoce de 95 jours environ (tableau III). Le semis a été effectué sans labour du sol dans des poquets de 10 à 15 cm de profondeur entre le mois de mai et juin après la première pluie utile (10-20 mm) de chaque année, sauf en 2012 où le semis a été effectué en début juillet. La densité de semis était de 10 000 poquets/ha avec des écartements de 1 m x 1 m pour les parcelles qui ont porté les systèmes de culture mil continu et mil en rotation avec le niébé, et de 6 667 poquets/ha avec des écartements de 1 m x 1,5 m pour les parcelles qui ont porté le système de culture mil en association avec le niébé. La levée a lieu environ 2 à 3 jours après le semis de chaque année. Le démariage a été effectué à 3 plants/poquet au premier sarclage. Le fumier de bovin a été épandu sur la surface du sol et enfoui à une profondeur de 15 cm par la houe manuelle traditionnelle appelée Hilaire, environ 2 à 3 semaines après le semis de chaque année. Les résidus de mil sont coupés chaque année et appliqués sur la surface du sol avant le semis.

Le Super Phosphate Simple (SSP) dosant 15-20% P₂O₅ et 20% S a été utilisé comme source de phosphore et épandu à la surface du sol puis incorporé par le premier sarclage. L'urée dosant 46% N a été utilisée comme source d'azote et apportée en deux fractions. La première fraction a été apportée au premier sarclage, environ 2 à 3 semaines après le semis et la seconde a été apportée environ 7 à 8 semaines après le semis. Les pesticides ont été rarement utilisés. La récolte a été effectuée entre fin septembre et début novembre de chaque année.

Trois lignes semis correspondant à une superficie utile de 24 m² ont été récoltées dans les systèmes de culture mil continu et mil en rotation avec le niébé, et 2 lignes correspondant à une superficie utile de 26,67 m² dans le système de culture mil en association avec le niébé.

La longueur des lignes récoltées était de 8 m dans les trois systèmes de culture. Les épis sont coupés mais les tiges sont laissées sur la parcelle d'essai. Au début de la prochaine campagne, les tiges de chaque parcelle sont coupées et étalées à la surface du sol.

La biomasse totale et les rendements grain sont évalués à la fin de chaque campagne agricole.

Tableau III : Caractéristiques agromorphologiques de la variété CIVT

Cycle semis-floraison	60-65 jours après semis
Cycle semis-50% maturité	90-95 jours après semis
Hauteur moyenne des plantes à maturité	2-2,5 m
Aptitude au tallage	Moyenne
Longueur de la chandelle	Longue
Rendement potentiel	2-2,5 t/ha
Poids de 1000 grains	9-11 g
Autres caractères	Tolérante à la verse et aux foreurs des tiges ; Résistante à l'ergot ; Sensible au Striga, au charbon et à la mineuse de l'épi ; Très sensible à la sécheresse de fin de cycle

Source : INRAN-Niger (2012)

2.3. Collecte des données

Cette étude a utilisé trois bases de données historiques (non simulées renseignant une période passée). La première base a réuni les données agronomiques expérimentales (données sur la gestion de la culture et l'analyse des sols) provenant de l'essai sur la période 1998-2013 et obtenues au niveau du Centre Sahélien de l'ICRISAT. La deuxième base était celle de la série de données climatiques journalières à l'échelle de la station (précipitations, températures maximales et minimales de l'air, radiation solaire, évapotranspiration, vitesse des vents et humidité relative de l'air) collectées chaque année de janvier à décembre par le service météorologique du C.S.I sur la période 1983-2013. La troisième base était celle qui a réuni les prix des intrants utilisés dans l'essai.

Le coût des fertilisants (SSP et Urée) ont été fournis par le Réseau National des Chambres d'Agriculture de la République du Niger (RECA). Les prix d'achat du mil sur la période 1998-2013 ont été fournis par le Système d'Information sur les Marchés Agricoles du Niger (SIMA).

2.4. Description du modèle CERES-Millet de DSSAT

Le modèle CERES-Millet fait partie de la plateforme modulaire DSSAT. C'est un modèle de simulation du développement, de la croissance et du rendement du mil, fonctionnant à pas de temps journalier. Il intègre divers processus pour la simulation des bilans hydrique, carboné et azoté des cultures (IBSNAT, 1990). C'est la version 4.5 de DSSAT qui a été utilisée pour cette étude. Le bilan hydrique est basé sur le modèle de Ritchie (1998) qui considère un sol unidimensionnel dont le profil peut comprendre plusieurs couches. L'eau (pluie ou irrigation) s'infiltré dans la couche supérieure du profil après extraction du ruissellement selon la méthode USDA-SCS (Soil Conservations Service, 1972), telle que modifiée par Williams *et al.* (1984).

Le drainage est calculé selon une approche en cascade dans laquelle l'excès d'eau au-delà de la capacité au champ d'une couche est reversé automatiquement dans la couche inférieure. Le drainage ne se produit pas lorsque l'humidité du sol est inférieure à la capacité au champ. Les processus de transpiration et d'évaporation sont séparés. L'évaporation est fonction de la quantité d'énergie reçue à la surface du sol. La transpiration est proportionnelle à la quantité d'énergie interceptée par le couvert. Le bilan de l'azote et de la matière organique du sol peut être simulé soit avec le module de GODWIN (Godwin et Jones, 1991), soit avec le module CENTURY développé par Gijssman *et al.* (2002) et basé sur le modèle de Parton *et al.* (1988). Dans le cas de cette étude, c'est le module CENTURY qui a été utilisé parce que plus adapté aux sols pauvres. CENTURY simule la minéralisation, la nitrification et la dénitrification, l'hydrolyse de l'urée, la volatilisation de l'ammoniac pour les différentes formes de l'azote, de fertilisants organiques, de fumier et d'engrais.

La décomposition de la matière organique est fonction de la température du sol et de l'eau dans le sol. Les variables d'entrée du modèle sont relatives aux propriétés du sol ainsi que des sorties du module bilan hydrique. Le transport d'azote à travers les couches de sol est piloté par les flux d'eau du sol. Un facteur de fertilité du sol (SLPF), variant de 0 à 1, permet de prendre en compte l'effet des éléments nutritifs autres que l'azote, sur la croissance journalière en biomasse de la plante : sa réduction permet de diminuer les biomasses et rendements simulés.

Le développement phénologique dépend des températures en relation à 2 températures cardinales : la température de base (TBASE) et la température optimale (TOPT). Le cycle est découpé selon les 6 phases suivantes : germination-levée (P0), phase végétative de base (P1), phase sensible à la photopériode (P2), phase reproductrice allant de l'initiation paniculaire au déploiement de la feuille drapeau (P3), phase de floraison et de fécondation allant jusqu'au début du développement des grains, soit quelques jours après la fécondation (P4), puis la phase de remplissage des grains allant jusqu'à la maturité physiologique (P5). La durée de la phase photopériodique dépend de la valeur de la photopériode critique (P2O) et du coefficient de sensibilité au photopériodisme (P2R).

Les processus de croissance (photosynthèse, expansion des feuilles, croissance des grains, mobilisation de l'azote) dépendent aussi d'une température de base et d'une température optimale. Le module de croissance calcule la matière sèche potentielle comme une fonction linéaire du rayonnement photosynthétiquement actif (PAR) intercepté. Le taux de PAR intercepté par le couvert est une fonction exponentielle de l'indice de surface foliaire (LAI).

La matière sèche est allouée aux feuilles, à la tige et aux grains selon des coefficients de répartition qui varient selon le stade phénologique et qui sont sous l'influence des stress hydriques et azotés.

Le nombre de grains par plante est déterminé durant la phase de floraison en fonction du potentiel génétique du cultivar, du taux d'accumulation de carbone durant la floraison, de la température et des stress hydriques et azotés. La croissance du grain est fonction d'un taux de croissance potentielle journalier, qui peut être modifié par la température et la disponibilité en assimilats. Elle se poursuit jusqu'à la maturité physiologique. Le rendement final est le produit de la densité de population, du nombre de grains par plante et du poids d'un grain (Jones *et al.*, 2003).

2.4.1. Données d'entrées minimales du modèle

Pour fonctionner, le modèle requiert un minimum de données d'entrée qui peuvent se regrouper en trois catégories :

- les données climatiques journalières : précipitations, températures minimales et maximales, radiation solaire ;
- les informations sur le site : latitude, longitude, altitude, propriétés physiques, chimiques et morphologiques du sol, précédents culturels ;
- les informations relatives à la gestion de la culture : labour, densité de semis, type de semis, nombre de plants au mètre carré, profondeur de semis, application des engrais, coefficients génétiques du cultivar déterminés à partir de ses paramètres physiologiques, et les rendements mesurés.

Ces données nous ont permis d'avoir une idée sur les conditions réelles de culture de la plante pour pouvoir imiter le comportement de celle-ci ; autrement dit, de simuler les conditions d'essais (climat, sols, année) et d'évaluer le modèle.

2.4.2. Méthodologie d'application du modèle (paramétrage du modèle)

Le paramétrage du modèle a reposé principalement sur la méthodologie suivante. La première étape a consisté au calage (ou calibrage) du modèle. Ce processus a consisté à ajuster les paramètres du modèle de telle sorte que les résultats de la simulation soient semblables aux résultats réels. Une fois que le modèle a été calé, on est passé à la simulation qui permet l'obtention des résultats. Ensuite, a suivi l'étape d'évaluation du modèle qui a consisté à vérifier si statistiquement les résultats de la simulation ressemblent aux résultats réels. Ainsi, les résultats de la simulation ont été comparés aux résultats observés. Le processus final était la validation du modèle qui est la confirmation des résultats antérieurs.

2.4.2.1. Calage du modèle

Le calage (ou calibrage) est l'opération consistant à rechercher les valeurs des paramètres empiriques du modèle qui conduisent à la meilleure simulation de la réalité (Sinclair et Seligman, 1996). Il consiste donc, à ajuster les valeurs des paramètres pour que les sorties du modèle correspondent aux valeurs expérimentales obtenues au champ (Jones et Luyten, 1998 cités par (Dzotsi, 2002). Ce calage se fait dans des conditions climatiques et édaphiques bien déterminées ; ce qui fait qu'à ce stade, le modèle calé n'a de valeur prédictive que locale (Dzotsi, 2002). Pour effectuer cette opération, plusieurs fichiers ou modules DSSAT ont été exécutés afin de permettre l'introduction des données d'entrées. Il s'agissait du module Météo de DSSAT (WeatherMan : gestionnaire des données météorologiques), du module Sol de DSSAT (SBuild : gestionnaire des données du sol), du module données de gestion de la culture de DSSAT (XBuild), et du module données expérimentales de DSSAT (ATCreate : gestionnaire des données expérimentales).

❖ Exécution du module « Météo de DSSAT »

Les données climatiques journalières collectées (précipitations, températures minimales et maximales, radiation solaire) ont été intégrées dans le module et ont consisté en la création d'une station météorologique comportant 31 années de données observées (1983 à 2013).

❖ Exécution du module « Sol de DSSAT »

Un profil a été décrit sur le site expérimental. Le sol est de type sableux. Les informations générales sur le site (latitude, longitude, altitude), la surface du sol (pente, couleur du sol, perméabilité, classe de drainage), les caractéristiques du profil du sol (propriétés physiques, chimiques et morphologiques du sol, précédents culturels, pourcentage de sables, de limons et d'argile, carbone organique, pH du sol, saturation en aluminium, capacité d'échange cationique, bases échangeables, abondance des racines) ont été intégrées dans le module.

Ces informations renseignent le modèle sur les conditions initiales du sol avant l'implantation de l'essai.

❖ Exécution du module « données de gestion de la culture de DSSAT »

Dans ce module, les paramètres de l'expérimentation ont été décrits, à savoir : la présentation du dispositif expérimental (nombre de répétitions, taille parcellaire, type de culture, etc.) ; les opérations de gestion de la culture (labour, dates de semis, densité de semis, type de semis, distance entre les lignes, profondeur de semis, avec ou sans irrigation, dates et quantités des engrais apportés) qui peuvent être programmées à des dates fixes ou bien relatives aux stades

phénologiques de la plante ; les conditions du sol (analyses chimiques) ; les coefficients génétiques de la variété CIVT déterminés à partir de ses paramètres physiologiques.

❖ **Exécution du module « données expérimentales de DSSAT »**

Dans ce module, les paramètres expérimentaux (Afile), à savoir les rendements grain obtenus ont été introduits afin de permettre une comparaison entre les paramètres observés et ceux simulés.

❖ **Phénologie du cultivar**

Le calage de la phénologie de la variété CIVT a consisté à définir les valeurs des paramètres qui régulent les phases phénologiques, afin de minimiser les différences entre valeurs observées et valeurs prédites pour les dates de floraison et maturité, l'indice de surface foliaire (LAI), les biomasses aériennes et le rendement en grain. Ces paramétrages ont été effectués par Fatondji *et al.* (2009) dans une étude antérieure qui a utilisé les données de l'essai afin de définir ses coefficients génétiques (P1, P2O, P2R, P5, G1, G4, PHINT), ajustés de sorte que la date de maturité simulée soit étroitement rapprochée de celle observée. Ce calage a été effectué en utilisant l'estimateur de coefficient génétique Glue qui est un utilitaire d'estimation des coefficients génétiques incorporés 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) ont été ajustés aux résultats de simulation. Sur le plan agronomique, ces coefficients génétiques représentent la potentialité génétique intrinsèque du cultivar indépendamment des stress environnementaux. L'option a été faite au cours de la présente étude d'utiliser le modèle ainsi calé pour simuler les conditions d'essais (climat, sols, année), et de ne procéder qu'à une évaluation (validation) du modèle.

2.4.2.2. Simulation et données de sortie

La simulation (imitation) a consisté à faire apparaître les états successifs du système grâce à un système mathématique de transformations de données expérimentales définissant l'état initial. Le scénario étudié a concerné des combinaisons optimales des niveaux des facteurs étudiés pour la production du mil. Le type de production simulé a concerné une production de mil limitée par les facteurs climatiques et les nutriments du sol en condition pluviale.

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

À la sortie de la simulation, le modèle a estimé les paramètres phénologiques, les composantes de rendement, et les rendements ainsi que d'autres paramètres.

Les rendements grain, la biomasse produite et la biomasse totale simulés par le modèle ont été mis en parallèle avec les données mesurées pour évaluer la performance du modèle.

2.4.2.3. Evaluation de la performance du modèle (validation)

Une fois calé, le modèle dont on veut faire un usage plus général, doit être testé dans des conditions de sol, de climat et de culture différentes. 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 (Jones et Kiniry, 1986 ; Du Toit *et al.*, 2001). La validation désigne 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 (Dzotsi, 2002).

Dans la présente étude, les données mesurées lors de l'expérimentation (rendements) ont été utilisées pour évaluer la performance de prédiction du modèle. Pour cela, une combinaison de représentations graphiques et de tests statistiques ont été utilisés pour explorer l'aptitude du modèle à simuler la réponse des principales variables par rapport aux traitements testés.

Il s'agissait de la comparaison de valeurs basée sur la ligne 1:1 couplée avec le coefficient de corrélation R (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), l'erreur moyenne normalisée de prédiction NRMSE (Loague et Green, 1991 ; Jamieson *et al.*, 1991), et la différence moyenne et le ratio entre les moyennes observées et simulées.

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

Si le modèle était un bon 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 $R^2 = 0,64$ 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).

$$RMSE = \left[n^{-1} \sum_{i=1}^n (s_i - m_i)^2 \right]^{0.5}$$

$$NRMSE = \frac{RMSE}{Moyenne\ observée} \times 100$$

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

2.4.2.4. Application du modèle à la prédiction des rendements (analyse saisonnière)

Les données biophysiques et économiques ont été introduites dans le module « analyse saisonnière » (Varan) du modèle. Le dispositif expérimental a été décrit dans le modèle afin de déterminer sur une période allant de 1983 à 2013 (31 ans), le meilleur traitement. Seules les variations du climat sont prises en considération, les autres données restent inchangées. Les meilleurs traitements sont ceux qui présentent une bonne moyenne et une faible variabilité sur la période considérée. L'analyse saisonnière est l'analyse de la performance de l'effet des traitements sur la croissance et le développement de la 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 des données économiques.

Cette analyse traite des revenus monétaires des rendements des traitements et 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). L'analyse financière a été effectuée par introduction dans le modèle des coûts de production (coûts des engrais et de leur application) et des prix de vente du mil grain (tableau IV). Le prix de vente du mil considéré a été déterminé en calculant la moyenne à partir des différentes variations de prix qu'a connue le mil au cours de la période d'expérimentation dans la zone d'étude. Les autres coûts de production du mil, à savoir les travaux de préparation du sol, le semis, les sarclages, etc. ont été considérés comme identiques pour tous les traitements et n'ont pas été pris en compte dans le calcul de rentabilité.

Tableau IV : Prix de vente et coûts de production de mil dans la zone d'étude

Prix de vente du mil (F CFA/kg)	200
Prix des sous-produits de récolte (F CFA/t)	10000
Coût des intrants	
Semences (F CFA/kg)	200
Valeurs de N (F CFA/kg)	650
Valeurs de P (F CFA/kg)	700
Amendements organiques (F CFA/t)	12500
Coûts d'application des intrants	
N (F CFA/ha)	10000
P (F CFA/ha)	10000

2.4. Traitement et analyse statistique des données

Les données collectées ont été traitées avec le tableur Microsoft Excel 2013. Le logiciel de statistique générale GenStat 12th Edition a servi à effectuer l'analyse de variance conformément au dispositif expérimental. La séparation des moyennes des traitements a été effectuée par le test de Student-Newman-Keuls au seuil de signification 5%.

Les simulations ont été effectuées avec le modèle agricole DSSAT v4.5, aussi bien pour le calage que pour l'évaluation (validation).

Chapitre 3 : Résultats

3.1. Pluviométrie, température et radiation solaire au cours de la période d'essai

Au cours de la période 1998-2013, la pluviométrie moyenne annuelle a été de 557,2 mm, avec un minimum de 448,3 mm observé en 2000 et un maximum de 766,6 mm observé en 1998 (figure 4). Par ailleurs, ce sont les années 1998, 1999, 2004, 2006, 2010, 2012 et 2013 qui ont été les plus pluvieuses avec des quantités d'eau supérieures à la moyenne interannuelle. L'analyse des précipitations mensuelles sur la période 1998-2013 montre que le C.S.I reçoit ses premières pluies pendant le mois de mai (5,5% des observations) (figure 5). À partir de mai, la quantité de pluie reçue augmente progressivement jusqu'au mois d'août qui enregistre la plus importante quantité de pluies (34,1% des observations). À partir de septembre, les précipitations amorcent une diminution progressive jusqu'à la fin des pluies en octobre (4,2% des observations). On constate également que les plus importantes quantités pluviométriques moyennes mensuelles de l'année sont réparties entre les mois de juin, juillet, août et septembre qui concentrent l'essentiel du cumul saisonnier. Ils représentent 89,3% du cumul pluviométrique.

Ces fluctuations pluviométriques pourraient avoir des répercussions négatives sur la production du mil, qui dépend dans une très large mesure des conditions climatiques, notamment des problèmes lors des stades critiques de croissance.

Les températures de l'air du C.S.I présentent de grandes variations saisonnières sur la période 1998-2013 (figure 5). La température minimale annuelle a varié de 21,4 °C en 2008 à 23,0 °C en 2010 avec une moyenne de 22,2 °C. La température maximale annuelle se situait entre 36,1 °C en 2012 et 37,2 °C en 2003 avec une moyenne de 36,7 °C pendant les 16 années.

Les moyennes mensuelles des températures minimales et maximales ont oscillé respectivement de 16,3 °C et 32,0 °C en janvier et août à 27,5 °C et 42,0 °C en mai et avril. La moyenne mensuelle maximale s'observe pendant le mois d'avril avec un maximum de 42,0 °C ; par conséquent c'est le mois le plus chaud de l'année. Le diagramme reliant température et pluie ou diagramme ombrothermique du C.S.I (figure 5) sur la période 1998-2013 permet d'observer, en général, de faibles valeurs des températures pendant les mois de fortes pluviométries et de fortes valeurs pendant les mois de faibles pluviométries. À partir de juin, les températures diminuent progressivement pour atteindre une valeur faible en août, mois le plus pluvieux. Le mois d'octobre marque une nouvelle hausse des températures maximales. Cette hausse pourrait se justifier par l'arrêt des pluies pendant ce mois. Une autre baisse de la température s'observe à partir du mois de novembre pour atteindre une valeur moyenne de 24,7 °C en janvier, le mois

le plus frais de l'année. Cette période coïncide avec l'action de l'harmattan sur la zone sahélienne. Finalement, l'analyse permet de conclure que les températures sont élevées dans leur ensemble, mais varient continuellement entre périodes de forte chaleur et faible chaleur au cours de l'année.

Le rayonnement solaire moyen annuel était de 23,2 MJ/m²/j et était compris entre 21,8 MJ/m²/j en 2013 et 24,7 MJ/m²/j en 2008. À l'intérieur de l'année, les mois de février à juin enregistrent les plus fortes valeurs de radiation solaire par rapport aux autres mois de l'année (figure 6). À partir de juin, la radiation solaire diminue progressivement pour atteindre une valeur faible en août. Le mois de septembre marque une nouvelle hausse de la radiation solaire jusqu'en novembre et une autre baisse s'observe à partir de ce mois. Ces variations de la radiation solaire correspondent à celles des températures (figures 5 et 6).

Bien que la température et le rayonnement solaire aient eu des tendances similaires au cours des 16 années, les conditions pluviométriques très contrastées de la période restent très pertinentes pour tester le modèle en termes de réponse du mil aux options de gestion de la fertilité en zone sahélienne du Niger.

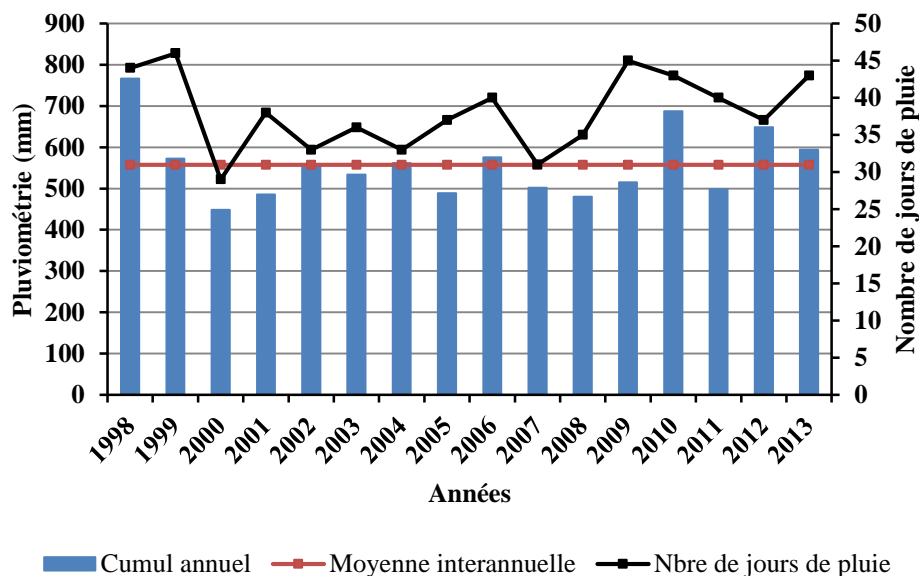


Figure 4 : Evolution de la pluviométrie annuelle et du nombre de jours de pluie du C.S.I (1998-2013)

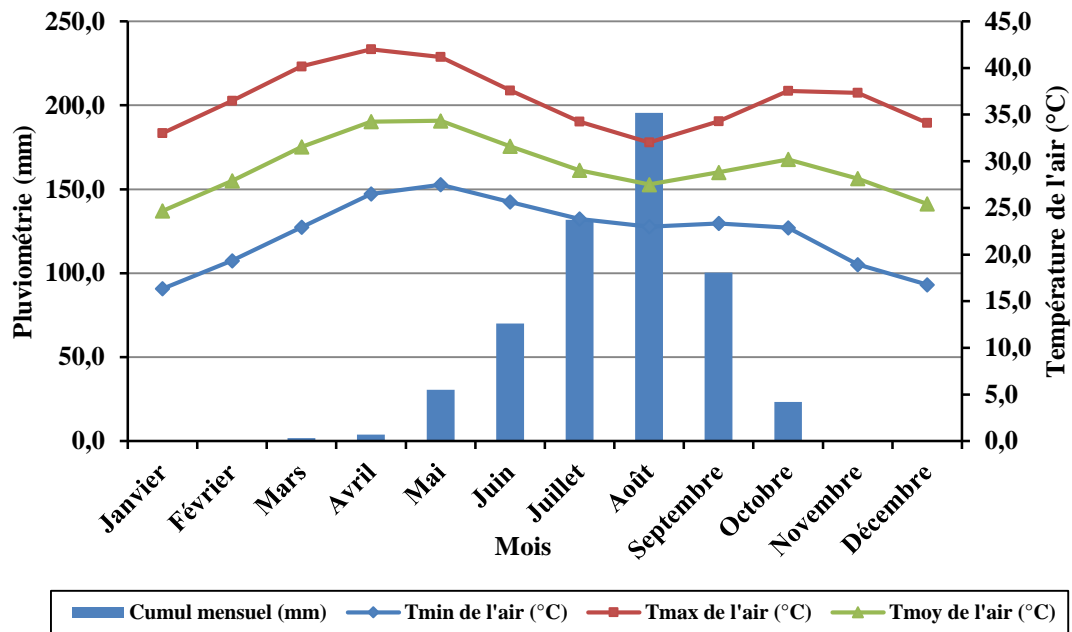


Figure 5 : Diagramme ombro-thermique du C.S.I (1998-2013)

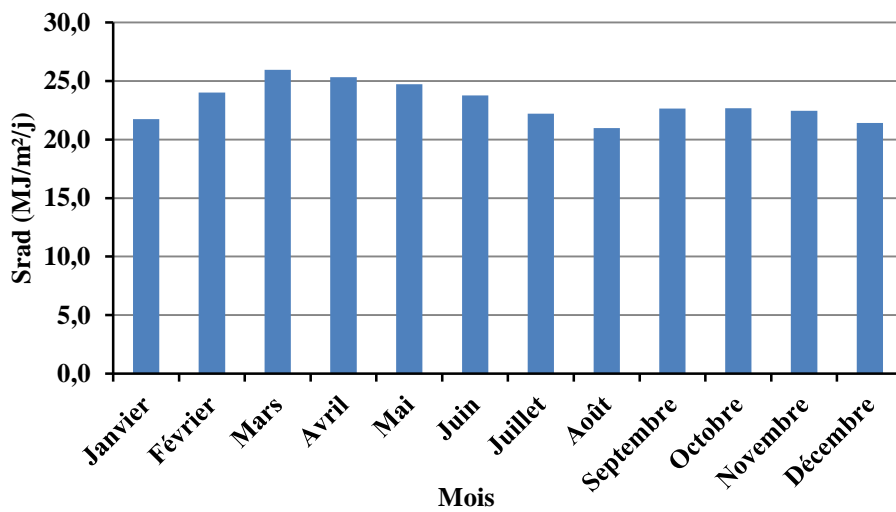


Figure 6 : Evolution de la radiation solaire moyenne mensuelle du C.S.I (1998-2013)

3.2. Effet à long terme des traitements sur les rendements grain du mil

3.2.1. Système mil continu

Le tableau V présente les rendements moyens annuels en grain dans le système mil continu sur la période 1998-2013. En considérant la moyenne de tous les traitements, l'analyse statistique révèle des différences très hautement significatives entre les années sur la période 1998-2013 ($P < 0,001$). Les rendements du mil ont varié de 443,7 kg/ha en 2007 à 1147,7 kg/ha en 1999, avec une moyenne de 762,4 kg/ha. Les meilleurs rendements grain ont été respectivement obtenus en 1999, 2001, 1998, 2009, 2003, 2005 et 2002.

L'effet des traitements a été aussi très hautement significatif sur le rendement grain (tableau VI) ($P < 0,001$). Le meilleur rendement grain a été obtenu avec le traitement R2F2M1 qui a enregistré une différence de 840 kg/ha par rapport au témoin R0F0M0, qui a eu le rendement grain le plus bas.

Tableau V : Rendements moyens annuels en grain (système mil continu, 1998-2013)

Année	Rendement moyen en grain (kg/ha)
1999	1147,7 a
2001	995,2 b
1998	956,5 bc
2009	930,3 bcd
2003	925,8 bcd
2005	842,5 cde
2002	814,8 def
2008	721,4 fg
2000	719,8 efg
2012	702 fg
2011	641 gh
2010	640,7 gh
2004	600,2 gh
2013	589,4 gh
2006	526,8 hi
2007	443,7 i
Moyenne	762,4
LSD	96,1
CV%	40,9
Probabilité α	< 0,001
Test SNK	THS

Source : Test de Student-Newman-Keuls sur les rendements grain de mil

N.B : les moyennes affectées d'une même lettre dans une même colonne ne sont pas statistiquement différentes au seuil de probabilité 5% par le test de Student-Newman-Keuls.

LSD : plus petite différence significative ; *CV* : Coefficient de variation ; *THS* : Très Hautement Significatif ; *SNK* : Student-Newman-Keuls

Tableau VI : Rendements moyens annuels en grain en fonction des traitements (système mil continu, 1998-2013)

Traitements	Rendement moyen en grain (kg/ha)
R2F2M1	1098,6 a
R2F2M2	1058,7 ab
R1F2M2	1027,3 abc
R2F1M2	1024,6 abc
R2F2M0	1013,1 abcd
R0F2M2	997,5 abcd
R1F2M1	969,5 bcde
R0F1M2	921,7 cdef
R1F1M2	903,5 cdefg
R2F1M1	896,4 defg
R0F2M1	867,7 efg
R2F1M0	833,3 fg
R1F2M0	827 fg
R0F2M0	815,9 fg
R1F1M1	791,8 g
R0F1M1	697,8 h
R2F0M2	664,9 hi
R1F0M2	655,4 hi
R0F1M0	655,3 hij
R0F0M2	610,6 hijk
R2F0M1	586 hijk
R1F1M0	544,4 ik
R2F0M0	516,7 kl
R0F0M1	516 kl
R1F0M1	433,6 lm
R1F0M0	397,6 m
R0F0M0	258,6 n
Moyenne	762,4
LSD	333,2
CV%	27,3
Probabilité α	< 0,001
Test SNK	THS

Source : Test de Student-Newman-Keuls sur les rendements grain de mil

N.B : les moyennes affectées d'une même lettre dans une même colonne ne sont pas statistiquement différentes au seuil de probabilité 5% par le test de Student-Newman-Keuls.

LSD : plus petite différence significative ; *CV* : Coefficient de variation ; *THS* : Très Hautement Significatif ; *SNK* : Student-Newman-Keuls

3.2.2. Système mil en rotation avec le niébé

On constate dans le tableau VII qu'il y a une différence très hautement significative entre les années dans le système mil en rotation avec le niébé sur la période 1998-2013 ($P < 0,001$).

Les meilleurs rendements grain ont été respectivement obtenus au cours des années 1998, 1999 et 2001 qui sont statistiquement identiques.

L'année 1998 a enregistré le rendement grain le plus élevé pendant que l'année 2007 a eu le rendement le plus bas. Le rendement moyen pour ce système de culture a été de 958,5 kg/ha.

Concernant les applications des traitements, les effets sont très hautement significatifs sur le rendement grain du mil sur la période 1998-2013 ($P < 0,001$) (tableau VIII). Le meilleur rendement grain a été obtenu avec le traitement R2F2M2 avec un supplément de rendement grain de 955,6 kg/ha par rapport au témoin R0F0M0 qui a obtenu le plus faible rendement grain.

Tableau VII : Rendements moyens annuels en grain (système mil en rotation avec le niébé, 1998-2013)

Année	Rendement moyen en grain (kg/ha)
1998	1359,4 a
1999	1325,6 a
2001	1310,9 a
2005	1103,7 b
2003	1091,3 b
2009	1051,3 b
2000	1041,9 b
2004	1004,5 b
2008	990 bc
2002	956,7 bc
2010	857,2 cd
2012	769,2 de
2011	707 ef
2013	649,5 efg
2006	598,1 fg
2007	520,1 g
Moyenne	958,5
LSD	111,1
CV%	37,6
Probabilité α	< 0,001
Test SNK	THS

Source : Test de Student-Newman-Keuls sur les rendements grain de mil

N.B : les moyennes affectées d'une même lettre dans une même colonne ne sont pas statistiquement différentes au seuil de probabilité 5% par le test de Student-Newman-Keuls.

LSD : plus petite différence significative ; *CV* : Coefficient de variation ; *THS* : Très Hautement Significatif ; *SNK* : Student-Newman-Keuls

Tableau VIII : Rendements moyens annuels en grain en fonction des traitements (système mil en rotation avec le niébé, 1998-2013)

Traitements	Rendement moyen en grain (kg/ha)
R2F2M2	1334,9 a
R0F2M2	1285,5 ab
R2F1M2	1272,9 ab
R1F2M2	1265,5 ab
R2F2M0	1247 abc
R1F2M1	1233,8 abc
R2F2M1	1224,8 abc
R1F1M2	1176,8 bcd
R1F2M0	1132,7 cde
R2F1M1	1089,8 def
R0F1M2	1050,8 efg
R0F2M1	1047,2 efg
R2F1M0	993 fg
R1F1M1	981,2 fg
R2F0M2	976,1 fg
R0F2M0	965,8 fg
R1F0M2	928,6 gh
R0F1M1	837,5 i
R1F1M0	823,4 hi
R0F0M2	779,7 ij
R0F1M0	769,8 ij
R2F0M1	697,6 jk
R2F0M0	638,7 kl
R1F0M1	619,4 kl
R0F0M1	602,4 kl
R1F0M0	525,8 l
R0F0M0	379,3 m
Moyenne	958,5
LSD	361,6
CV%	23,5
Probabilité α	< 0,001
Test SNK	THS

Source : Test de Student-Newman-Keuls sur les rendements grain de mil

N.B : les moyennes affectées d'une même lettre dans une même colonne ne sont pas statistiquement différentes au seuil de probabilité 5% par le test de Student-Newman-Keuls.

LSD : plus petite différence significative ; *CV* : Coefficient de variation ; *THS* : Très Hautement Significatif ; *SNK* : Student-Newman-Keuls

3.2.3. Système mil en association avec le niébé

Dans le système mil en association avec le niébé, c'est en 2011 qu'on a obtenu le plus haut rendement grain, suivie de l'année 2003 (tableau IX). Les années 2013, 2006 et 2007 qui sont statistiquement identiques, ont enregistrés les plus faibles rendements grain. Le rendement moyen en grain pour ce système de culture a été de 584,9 kg/ha.

Le tableau X permet de voir que les traitements ont induit des effets très hautement significatifs sur le rendement grain du mil au cours des 16 ans d'expérimentation ($P < 0,001$). Le plus haut rendement grain a été obtenu avec l'application du traitement R2F2M2 et le plus bas, avec les traitements R0F0M0, R0F0M1 et R1F0M0 qui sont statistiquement identiques.

Tableau IX : Rendements moyens annuels en grain (système mil en association avec le niébé, 1998-2013)

Année	Rendement moyen en grain (kg/ha)
2001	920,9 a
2003	853,3 ab
2009	823,2 b
2005	664,7 c
2008	657,1 cd
2002	631 cde
1999	597,2 cdef
2010	590,7 cdef
2011	570,4 cdefg
2004	547,3 defg
2000	529,8 efg
1998	511,1 fg
2012	474,9 g
2013	365,2 h
2006	323,4 h
2007	298,5 h
Moyenne	584,9
LSD	77,9
CV%	43,2
Probabilité α	< 0,001
Test SNK	THS

Source : Test de Student-Newman-Keuls sur les rendements grain de mil

NB : les moyennes affectées d'une même lettre dans une même colonne ne sont pas statistiquement différentes au seuil de probabilité 5% par le test de Student-Newman-Keuls.

LSD : plus petite différence significative ; *CV :* Coefficient de variation ; *THS :* Très Hautement Significatif ; *SNK :* Student-Newman-Keuls

Tableau X : Rendements moyens annuels en grain en fonction des traitements (système mil en association avec le niébé, 1998-2013)

Traitements	Rendement moyen en grain (kg/ha)
R2F2M2	841,5 a
R2F1M2	822,9 ab
R2F2M1	798,3 abc
R1F2M2	796,4 abc
R0F2M2	789,1 abc
R1F2M1	770,1 abcd
R2F2M0	736,9 bcde
R2F1M1	711 cdef
R1F1M2	684,1 ef
R0F1M2	679,1 ef
R0F2M0	676,2 def
R0F2M1	663,5 ef
R2F1M0	637,9 f
R1F1M1	632,6 f
R1F2M0	627 f
R1F0M2	545,4 g
R2F0M2	529,2 g
R0F1M1	488,8 gh
R0F1M0	465,9 ghi
R0F0M2	465,3 ghi
R2F0M1	434,8 hi
R1F1M0	414,9 hij
R1F0M1	393,2 ij
R2F0M0	342,7 jk
R0F0M0	287,8 k
R0F0M1	287,5 k
R1F0M0	271,2 k
Moyenne	584,9
LSD	258,6
CV%	27,6
Probabilité α	< 0,001
Test SNK	THS

Source : Test de Student-Newman-Keuls sur les rendements grain de mil

NB : les moyennes affectées d'une même lettre dans une même colonne ne sont pas statistiquement différentes au seuil de probabilité 5% par le test de Student-Newman-Keuls.

LSD : plus petite différence significative ; *CV :* Coefficient de variation ; *THS :* Très Hautement Significatif ; *SNK :* Student-Newman-Keuls

3.2.4. Effet des systèmes de culture

L'analyse de variance permet de constater qu'il y a une réponse très hautement significative des systèmes de culture à l'application des traitements sur la période 1998-2013 ($P < 0.001$) (tableau XI). Ainsi, les rendements grain enregistrés montrent une meilleure réponse du système mil en rotation avec le niébé. Il est respectivement suivi des systèmes mil continu et mil en association avec le niébé.

Tableau XI : Rendements moyens en grain en fonction des systèmes de culture (1998-2013)

Système de culture	Rendement moyen en grain (kg/ha)
Mil en rotation avec le niébé	958,5 a
Mil continu (culture pure)	762,4 b
Mil en association avec le niébé	584,9 c
LSD	28.6
CV%	48,4
Probabilité α	< 0,001
Test SNK	THS

Source : Test de Student-Newman-Keuls sur les rendements grain de mil

NB : les moyennes affectées d'une même lettre dans une même colonne ne sont pas statistiquement différentes au seuil de probabilité 5% par le test de Student-Newman-Keuls.

LSD : plus petite différence significative ; *CV :* Coefficient de variation ; *THS :* Très Hautement Significatif ; *SNK :* Student-Newman-Keuls

3.3. Températures de l'air

Les températures minimales et maximales mensuelles de la station du C.S.I suivent une même tendance générale pour toutes les années sur la période d'expérimentation (1998-2013) (annexes III et IV). L'année 2009 a enregistré les plus fortes températures au cours de la période d'expérimentation. En se référant aux productions en grain par année sur le site sur la période 1998-2013, aucune corrélation directe ne se dégage entre celles-ci et les températures annuelles enregistrées. La production maximale obtenue dans chaque système de culture ne correspond pas à l'année de plus basses températures minimale et maximale, ni à l'année où ces températures sont élevées. L'année 2007 a obtenu le rendement grain le plus faible dans tous les systèmes avec des températures beaucoup plus faibles que les années 2004, 2005 et 2006. À l'inverse, en 2009, année la plus chaude, le rendement grain obtenu est nettement inférieur à ceux des années 1998 et 1999 au niveau du système mil continu et à ceux de 1998, 1999, 2001 et 2005 dans le système mil en rotation avec le niébé. Dans le système mil en association avec le niébé, la différence a été par rapport aux années 2001 et 2003.

3.4. Radiation solaire

Pour la radiation solaire du C.S.I sur la période 1998-2013, on ne distingue pas d'année particulière ; la tendance est la même (annexe V). Les variations de radiation solaire sont similaires à celles de températures.

3.5. Facteurs liés à la pluviométrie

3.5.1. Quantité de pluie enregistrée

Souvent, la grande quantité de pluie est considérée pour les cultures pluviales, comme synonyme d'une bonne récolte. Ceci peut-être vrai pour certaines cultures mais pas pour le mil qui est une culture bien adaptée au sahel. En se référant à la pluviométrie totale annuelle (figure 4), on constate que l'année 1999 a été mois pluvieuse (572,3 mm) que l'année 1998 (766,6 mm) alors qu'elle a obtenu le meilleur rendement grain au niveau du système mil continu. Egalement, du semis à la récolte, seulement 448,3 mm de pluie ont été enregistrés en 2000. Pourtant les rendements de cette année sont nettement supérieurs à ceux de 2007 où les pluies enregistrées pendant le même cycle étaient de 501,7 mm.

Ces résultats indiquent que la production en grain de mil n'est pas nécessairement proportionnelle à la quantité de pluie tombée au cours de l'année. Naturellement pour toute culture pluviale, il est nécessaire d'enregistrer une quantité appropriée de pluie pour le type de culture. Dans le cas du mil, la pluie est certes nécessaire mais d'autres facteurs pluviométriques influencent la production, notamment une bonne répartition dans le temps.

3.5.2. Longueur de la saison

La pluviométrie mensuelle, le nombre de jours de pluie ainsi que la longueur de la saison sont calculés ainsi pour voir si elles ont une influence sur la production du mil (annexes III et VII). C'est surtout au niveau de la production en grain qu'apparaissent des variations significatives alors que la production en tiges varie peu d'une année à l'autre. Ce constat amène à penser que la période de formation des graines est souvent affectée par des arrêts précoces des pluies. Les pluviométries mensuelles et le nombre de jours de pluie ne justifient les productions. Il n'y a pas de corrélation nette entre les pluviométries mensuelles, le nombre de jours de pluie et la production en grain de mil. Des pluviométries mensuelles et nombre de jours de pluie similaires n'ont pas entraîné les mêmes productions et ce constat est aussi valable pour des longueurs de saison similaires. En effet, les années 2005 et 2006 ont enregistré de mai à octobre un total de 40 jours de pluie avec des pluviométries respectives de 488,5 mm et 576,0 mm ; pourtant les rendements grain obtenus en 2006 étaient largement inférieurs à ceux de 2005 dans les trois systèmes de culture.

Ce constat est aussi valable pour l'année 2013 qui a obtenu le nombre maximal de jours de pluie (50 jours) avec un cumul de 571,5 mm mais le rendement grain est plus faible.

3.5.3. Répartition de la pluie

L'analyse de la répartition de la pluviométrie en fonction des stades de développement du mil (figure 7) donne assez de détails quant aux différences de production entre années sur la période 1998-2013. Dans le système mil continu, le plus haut rendement grain a été obtenu en 1999 et le plus bas, en 2007. La particularité entre ces deux années réside dans le fait que la pluviométrie a été moins bien répartie en 2007 qu'en 1999 par rapport aux stades de développement du mil. En effet, en 2007, déjà au stade 1 (émergence), une première période sèche de 10 jours (8-17 JAS) a été observée et une seconde à partir de 19 JAS après une pluie de 2,4 mm jusqu'au 28^{ème} JAS. De 44 à 55 JAS, une période sèche de 12 jours été observée après une pluie de 4.4 mm. Après le cycle a été marqué par d'autres périodes sèches de 6, 7 et 4 jours. Par contre en 2009, des périodes sèches importantes n'ont pas été enregistrées. Ces mêmes observations effectuées au niveau du système mil continu s'observent également dans les autres systèmes. Des quantités élevées de pluie (> 40 mm) ont été enregistrées en début de cycle et entre 40 et 60 JAS au cours des années 2000, 2006, 2011 et 2012. Finalement, la variation de rendement grain entre années, *toute chose étant égale par ailleurs* ne peut s'expliquer en partie que par la mauvaise distribution de la pluviométrie au cours des campagnes hivernales sur la période 1998-2013.

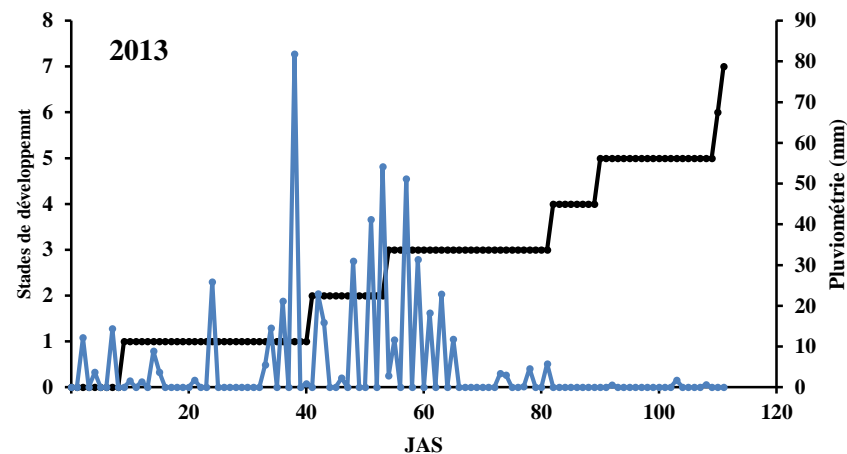
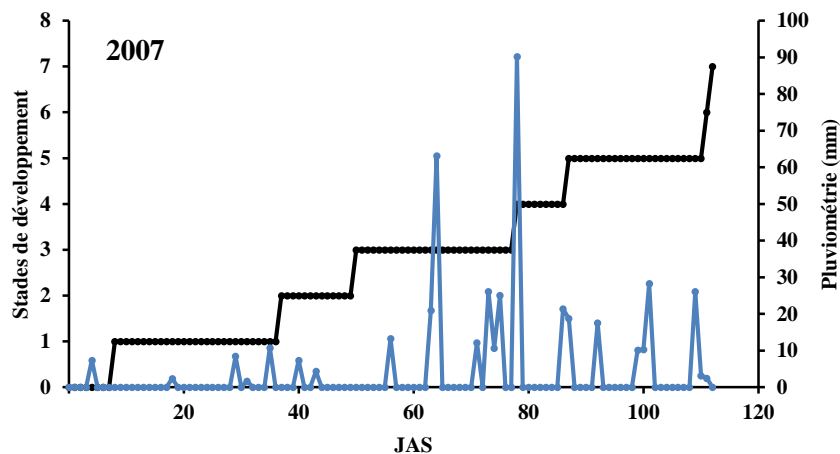
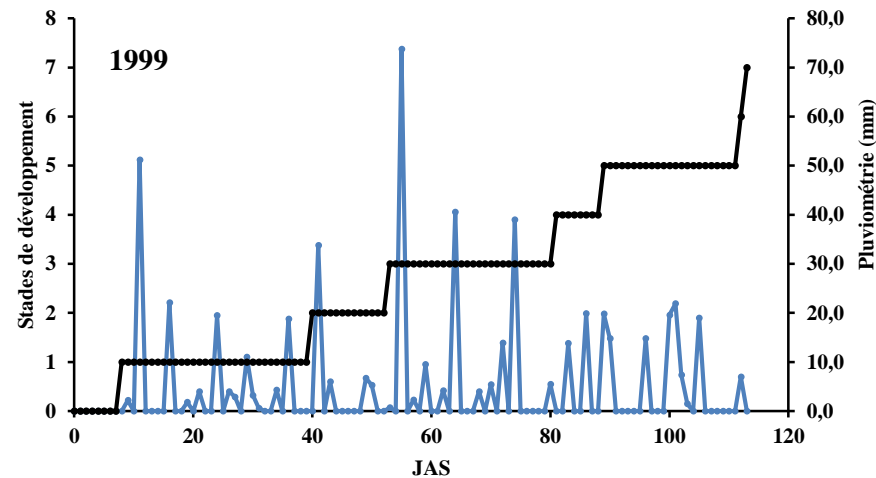
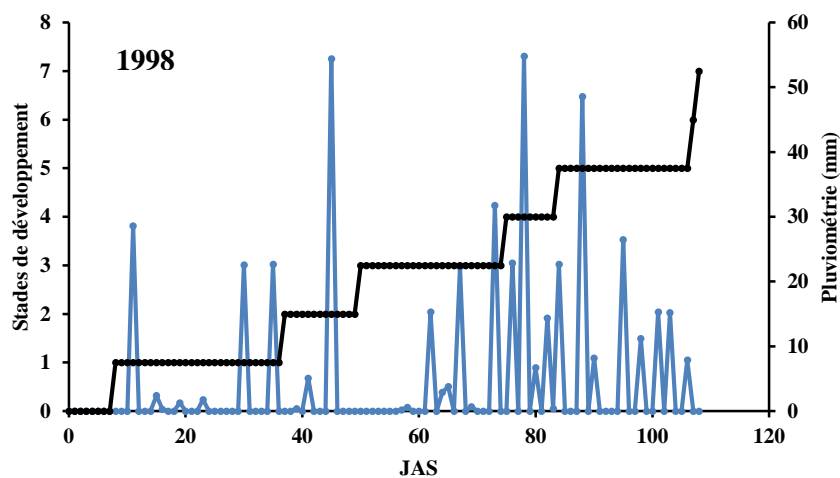


Figure 7 : Stades de développement du mil et répartition de la pluviométrie en 1998, 1999, 2007 et 2013 au Centre Sahélien de l'ICRISAT (Sadoré, Niger). Les traits bleus représentent les hauteurs de pluies journalières et les traits noirs, les stades de développement du mil.

N.B : 1 = Emergence-Fin de la phase juvénile ; 2 = Fin de la phase juvénile-Induction florale-juvénile ; 3 = Induction florale-Fin de la croissance des feuilles ; 4 = Fin de la croissance des feuilles-Début remplissage des grains ; 5 = Phase effective de remplissage des grains ; 6 = Fin phase effective de remplissage des grains-Maturité physiologique ; 7 = Récolte

3.6. Stades de développement et stress hydrique et azoté dans le cycle du mil

L'analyse des stress hydrique et azoté (figures 8 et 9) a révélé que sur toutes les années (bonnes ou mauvaises), le stress hydrique n'a jamais concerné les parcelles sans engrais (R0F0M0) qui constituent le témoin de la pratique paysanne en général. Par contre, le stress azoté pour le témoin se déclare à partir des 20 JAS pour s'étaler sur presque toute la durée du cycle. Sur les autres traitements, les stress hydriques se manifestent pendant les périodes sèches mais durent moins que les stress azotés qui eux-mêmes disparaissent autour des 80 JAS pour certaines années et pour d'autres, jusqu'à la fin du cycle.

Dans les trois systèmes, les stress hydrique et azoté varient en fonction de la combinaison des niveaux des facteurs et de la pluviométrie de l'année. Le stress hydrique de la dose R0 (300 kg R/ha) est plus faible que celui de R1 (900 kg R/ha) qui est lui aussi plus faible que celui de R2 (2700 kg/ha). Par contre, pour le stress azoté, on constate le cas contraire ; l'ordre de classement est le suivant : $R0 > R1 > R2$. Pour les stress hydriques des engrais minéraux et du fumier, l'ordre de classement respectif est le suivant : $F0 < F1 < F2$ et $M0 < M1 < M2$. Par contre, pour les stress azotés, on observe le classement inverse.

Le stress hydrique reste très élevé pour le traitement extrême R2F2M2 dans les systèmes mil continu et mil en rotation avec le niébé, particulièrement entre les stades 2 et 3 et en fin de cycle surtout en 2006, 2007, 2008, 2012 et 2013. En se référant à la répartition de la pluviométrie (figure 12), ces années ont connu des périodes sèches entre 40 et 80 JAS et des arrêts précoces de pluies vers 60, 80 et souvent jusqu'à 111 JAS. C'est en 2013 que l'arrêt des pluies a été plus précoce (60 JAS) et en 2007, de 20 à 60 JAS, aucune pluie importante n'a été observée.

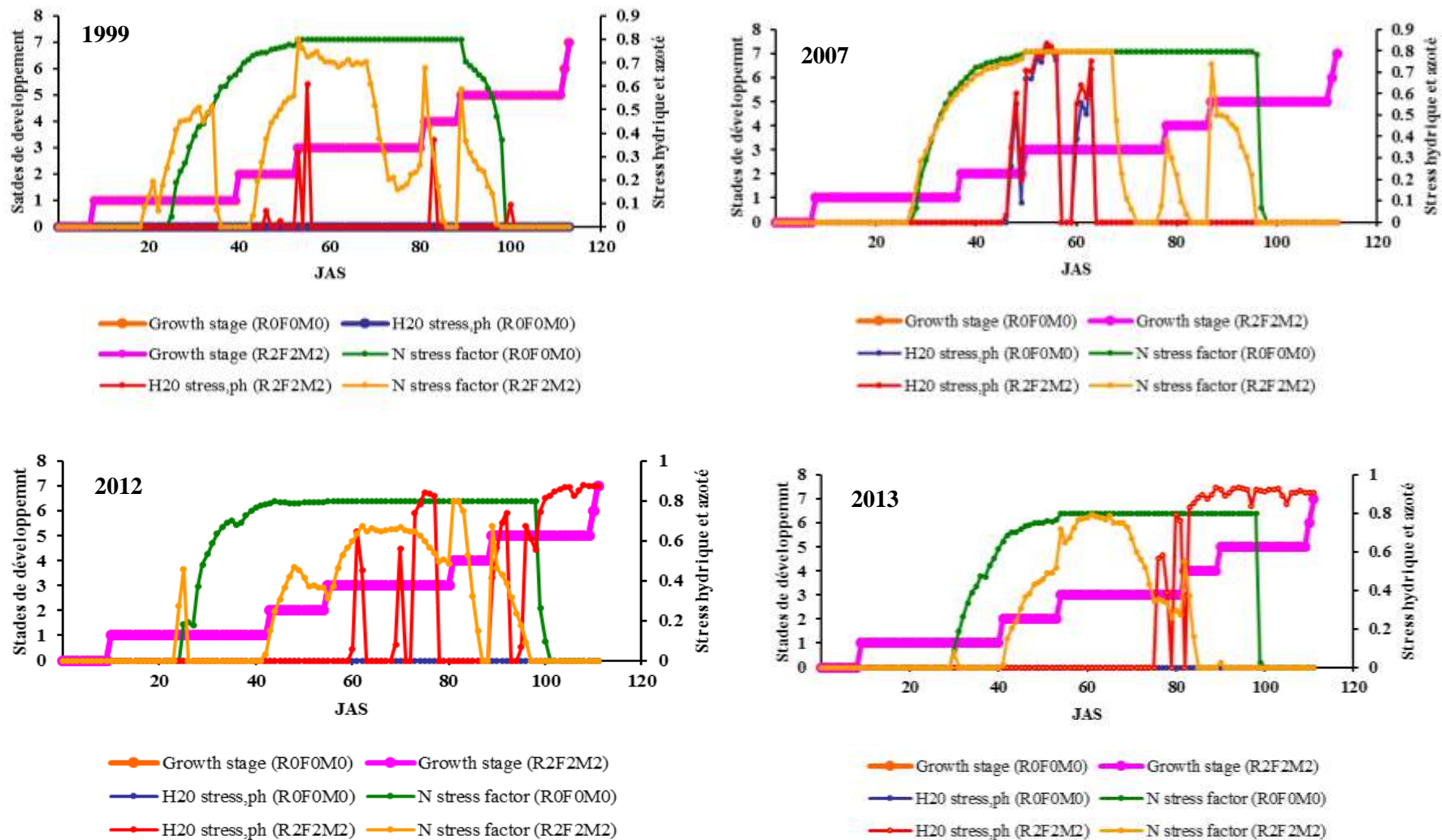


Figure 8 : Stades de développement et stress hydrique et azoté dans le cycle du mil (systèmes mil continu et mil en rotation avec le niébé) au Centre Sahélien de l'ICRISAT (Sadoré, Niger)

N.B : 1 = Emergence-Fin de la phase juvénile ; 2 = Fin de la phase juvénile-Induction florale-juvénile ; 3 = Induction florale-Fin de la croissance des feuilles ; 4 = Fin de la croissance des feuilles-Début remplissage des grains ; 5 = Phase effective de remplissage des grains ; 6 = Fin phase effective de remplissage des grains-Maturité physiologique ; 7 = Récolte

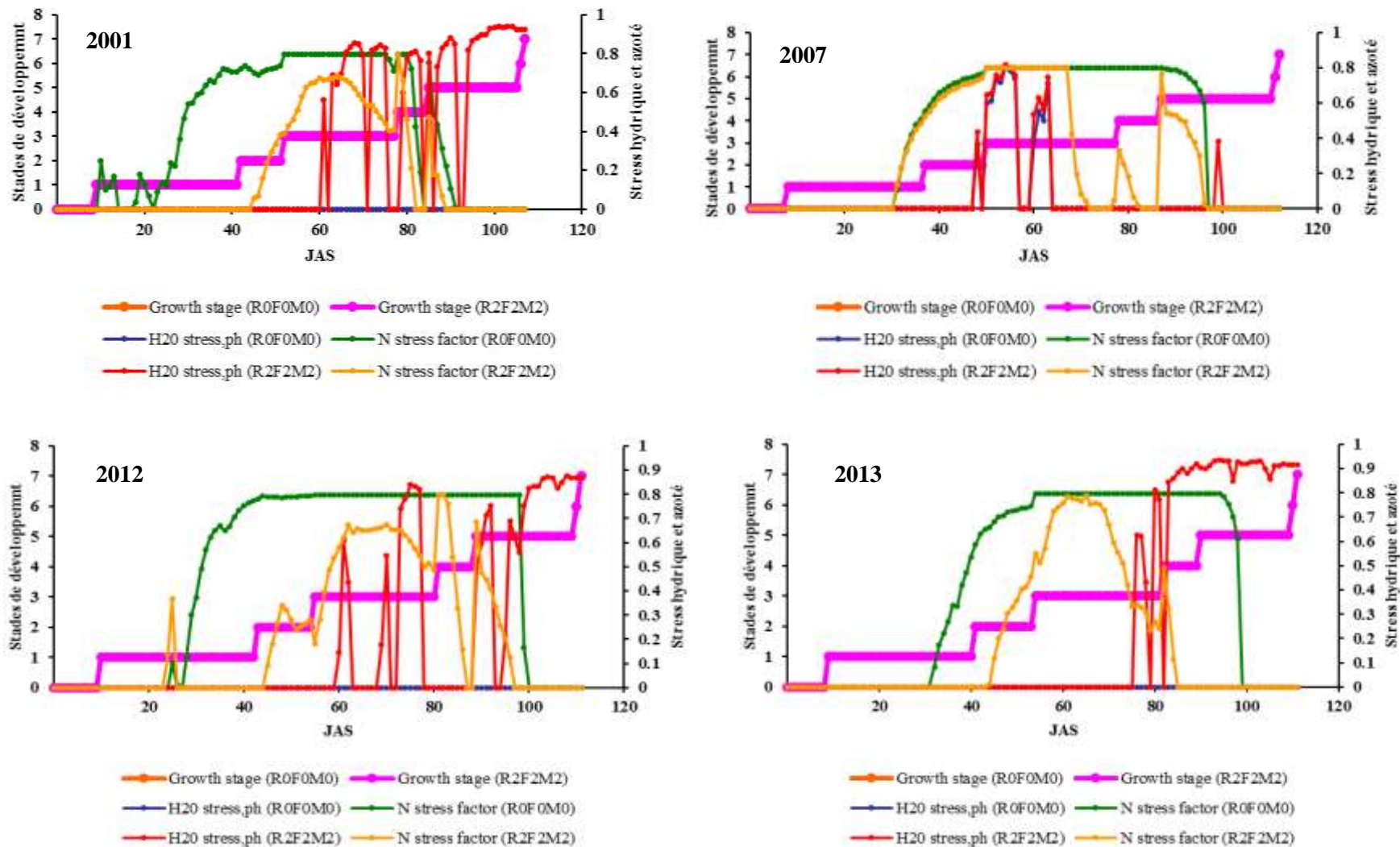


Figure 9 : Stades de développement et stress hydrique et azoté dans le cycle du mil (système mil en association avec le niébé) au Centre Sahélien de l'ICRISAT (Sadoré, Niger)

N.B : 1 = Emergence-Fin de la phase juvénile ; 2 = Fin de la phase juvénile-Induction florale-juvénile ; 3 = Induction florale-Fin de la croissance des feuilles ; 4 = Fin de la croissance des feuilles-Début remplissage des grains ; 5 = Phase effective de remplissage des grains ; 6 = Fin phase effective de remplissage des grains-Maturité physiologique ; 7 = Récolte

3.7. Résultats de la simulation de la croissance et du développement du mil

3.7.1. Calage du cultivar

Les résultats du calage des coefficients génétiques du cultivar de mil utilisé pour l'évaluation du modèle sont présentés dans le tableau XII.

Tableau XII : Résultats de l'ajustement des coefficients génétiques du cultivar CIVT

Coefficients	P1	P2O	P2R	P5	G1	G4	PHINT
Valeurs	652,0	12,40	142,0	300,0	1,00	0,70	65,00

N.B :

- **P1** : chaleur cumulée depuis l'émergence des plantules jusqu'à la fin de la phase juvénile (exprimée en degrés-jours au-dessus d'une température de base de 10 °C) au cours de laquelle la plante n'est pas sensible aux variations de photopériode.
- **P2O** : photopériode critique ou la plus grande longueur de journée (en heures) au cours de laquelle le développement se produit à un taux maximum. Pour des valeurs plus grandes que P2O, la vitesse de développement est réduite.
- **P2R** : mesure dans laquelle le développement phasique menant à l'initiation paniculaire (exprimée en degrés-jours) est retardée pour chaque augmentation d'une heure dans la photopériode au-dessus de P2O.
- **P5** : chaleur cumulée (degrés-jours au-dessus d'une température de base de 10 °C) depuis le début du remplissage du grain (3-4 jours après la floraison) à la maturité physiologique.
- **G1** : mesureur pour la taille relative de la feuille.
- **G4** : mesureur pour le partitionnement des assimilats de la panicule (sommet).
- **PHINT** : Phylochron intervalle ; intervalle de temps thermique ou chaleur cumulée (exprimée en degrés-jours) entre l'apparition de la pointe de deux feuilles successives.

3.7.2. Evaluation de la performance du modèle

La performance du modèle CERES-Millet de DSSAT dans la prédiction de la croissance et du développement du mil a été évaluée par une comparaison des rendements grain observés de l'essai à ceux simulés par le modèle pour la période 1998-2013.

3.7.2.1. Système mil continu

De la comparaison entre les rendements grains observés et ceux simulés par le modèle DSSAT au niveau du système mil continu pour la période 1998-2013, il ressort que la différence moyenne entre les valeurs simulées et observées est négative pour les années 1998, 1999, 2000, 2001, 2002, 2003, 2005, 2008, 2009, 2011, 2012, 2013 et positive pour les années 2004, 2006,

2007 et 2010 (annexe VIII). Le ratio (moyenne simulée/moyenne observée) est supérieur à 1 pour les années 2004, 2006 et 2010 et inférieur à 1 pour les autres années. Aussi, la majorité des points (>50%) sont au-dessous de la ligne 1:1 pour les années 1998, 1999, 2000, 2001, 2002, 2003, 2004, 2005, 2006, 2007, 2009, 2010, 2012 et 2013 (figure 15). Ce qui signifie que les rendements grains simulés ont donc été, pour la majorité des années, sous-estimés par le modèle DSSAT. La valeur du coefficient de détermination R^2 est élevée (supérieure à 0,50) pour ces années sauf en 2005, 2009, 2012 et 2013. Malgré le degré de sous-estimation du rendement grain, il existe donc une forte corrélation entre simulations et mesures. L'erreur moyenne de prédiction RMSE est beaucoup plus élevée en 2001, 2005, 2009 et 2013 que les autres années pour lesquelles les rendements grain ont été sous-estimés. L'erreur moyenne normalisée de prédiction NRMSE entre les rendements observés et simulés est supérieure à 30% pour ces années. Par contre, pour les années 2008 et 2011, la quasi-totalité des points (82%) sont au-dessus de la ligne 1:1 et l'erreur moyenne normalisée de prédiction NRMSE entre les rendements observés et simulés est égale à 29%.

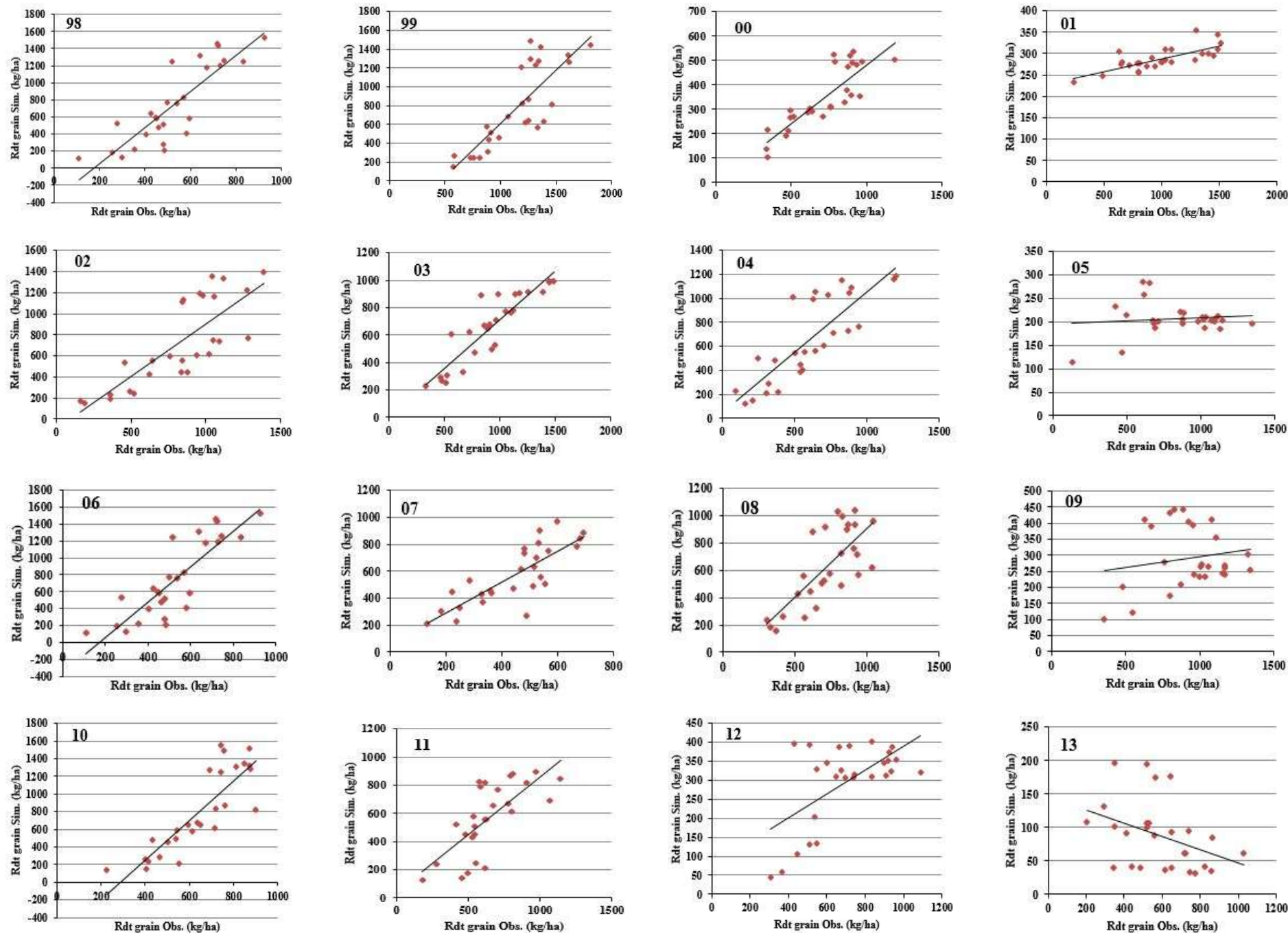


Figure 10 : Relation entre rendements grains observés et rendements grains simulés pour le système mil continu au Centre Sahélien de l'ICRISAT (Sadoré, Niger, 1998-2013)

3.7.2.2. Système mil en rotation avec le niébé

Les différents aspects de mesure statistique quantitative qui incorpore le biais de simulation pour ce système montrent que la différence moyenne entre les valeurs observées et simulées est positive pour les années 2006 et 2007 et les ratios sont supérieurs à 1 (annexe IX). Pour les autres années, la différence moyenne entre simulations et mesures est négative. Les ratios obtenus sont inférieurs à 1 mais plus proche de 1 pour les années 2002, 2010 et 2011.

La représentation dispersée des rendements grain observés en fonction de ceux simulés (figure 16) indique que la plupart des points (>50%) se situent au-dessous de la ligne 1:1 ; ce qui indique une sous-estimation des rendements grain par le modèle. Malgré le degré de sous-estimation globale du rendement grain, il existe une forte corrélation entre simulations et mesures ; les valeurs de R^2 sont supérieures à 0,50 sauf en 2000, 2005, 2008, 2009, 2010, 2011 et 2012.

L'erreur moyenne de prédiction RMSE est de 192,41 kg/ha en 2011 et l'erreur moyenne normalisée de prédiction NRMSE entre rendement grain observé et simulé est de 27%. Par contre, pour les autres années, l'erreur moyenne normalisée de prédiction NRMSE est supérieure à 30%.

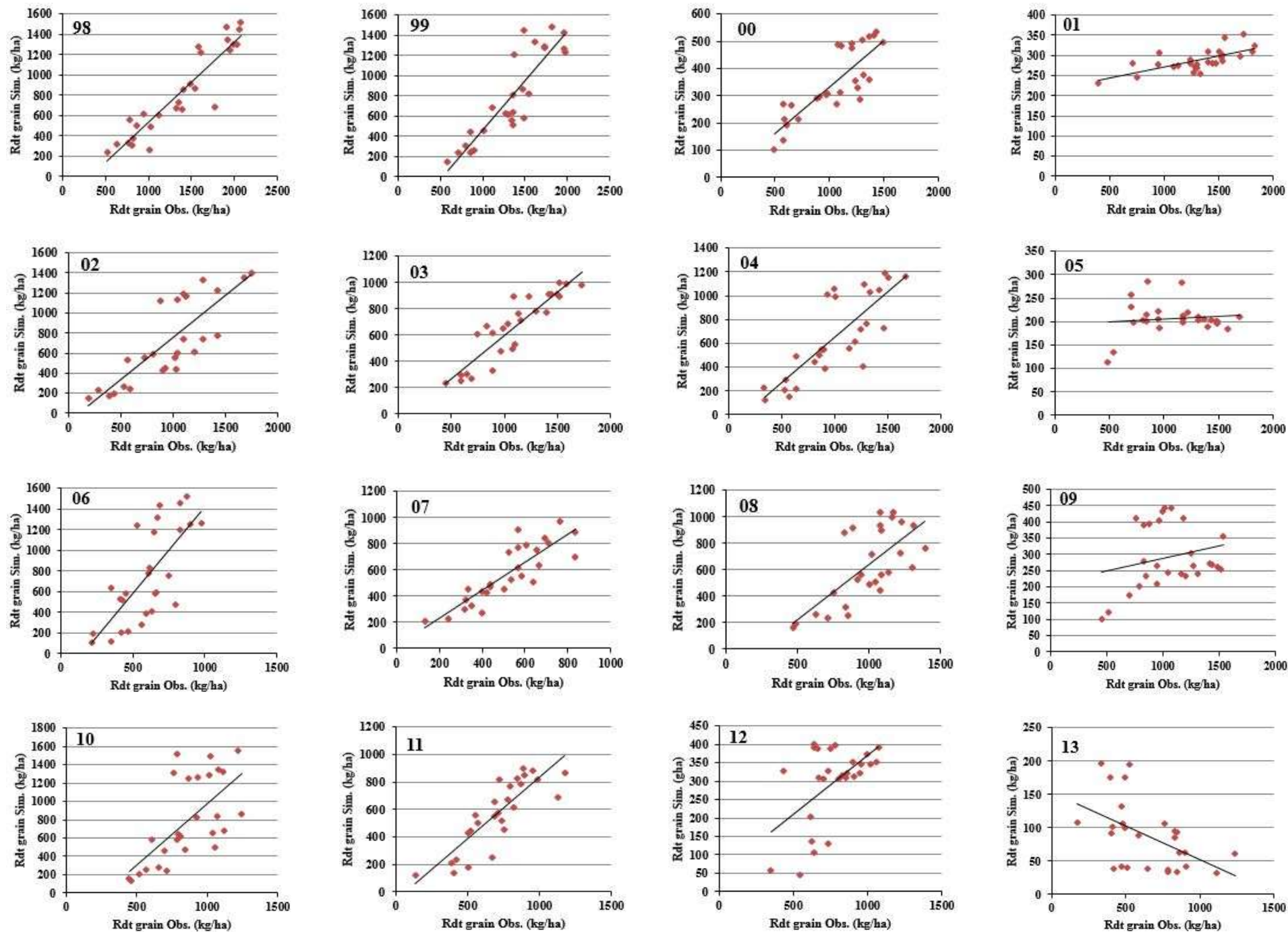


Figure 11 : Relation entre rendements grains observés et rendements grains simulés pour le système mil en rotation avec le niébé au Centre Sahélien de l'ICRISAT (Sadoré, Niger, 1998-2013)

3.7.2.3. Système mil en association avec le niébé

La comparaison des moyennes entre les rendements grains observés et ceux simulés par DSSAT montre que la différence moyenne entre les rendements grain simulés et observés est positive pour les années 1998, 1999, 2002, 2004, 2006, 2007 et 2010 et négative pour les autres années au cours de la période d'expérimentation (annexe X). La quasi-totalité des points sont au-dessous de la ligne 1:1 (figure 17) ; ce qui indique que les rendements grains simulés ont donc été sous-estimés par le modèle DSSAT.

Les valeurs du coefficient de détermination des années 1998, 1999, 2000, 2002, 2003, 2007 sont supérieures à 0,50 et indiquent que malgré le degré de sous-estimation du rendement grain, il existe une forte corrélation entre simulations et mesures. En 2011, par contre, le rendement grain a été surestimé par le modèle. En effet, 87% des points sont au-dessus de la ligne 1:1. L'erreur moyenne de prédiction RMSE est de 148,77 kg/ha pour cette année et l'erreur moyenne normalisée de prédiction NRMSE entre les rendements observés et simulés est égale à 26%. Pour les autres années, les valeurs de la NRMSE sont supérieures à 30%.

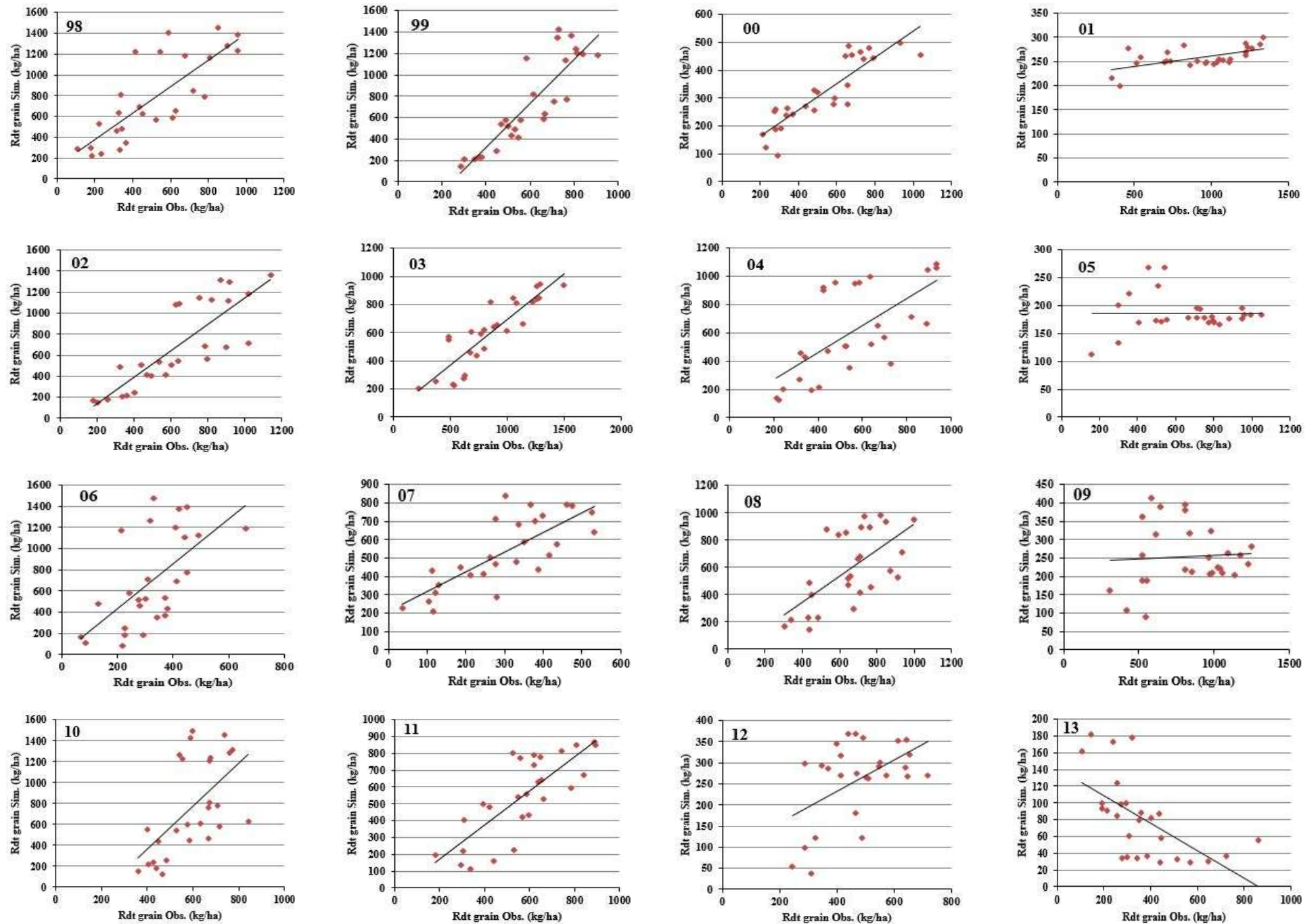


Figure 12 : Relation entre rendements grains observés et rendements grains simulés pour le système mil en association avec le niébé au Centre Sahélien de l'ICRISAT (Sadoré, Niger, 1998-2013)

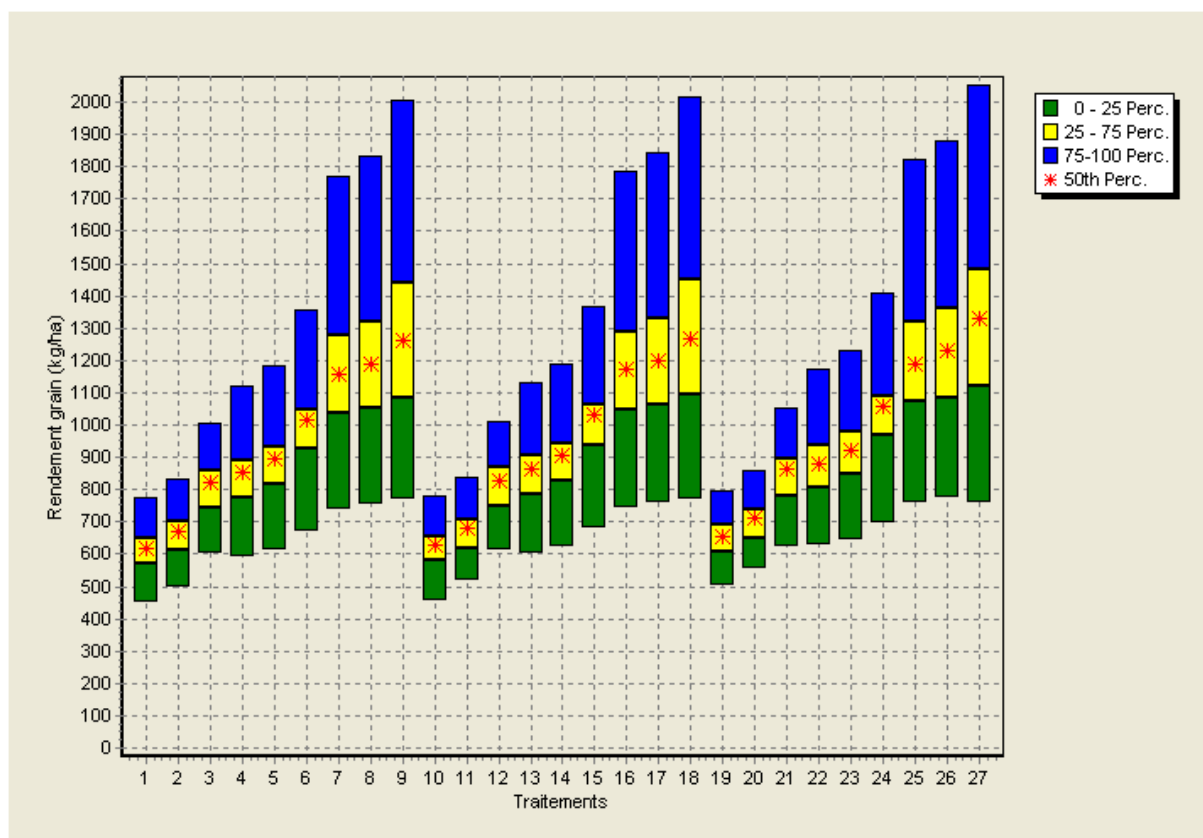
3.8. Application du modèle à l'évaluation pluriannuelle des traitements

Dans l'objectif de prendre en compte l'effet du climat, le programme d'analyse saisonnière du système DSSAT a été utilisé pour l'analyse des résultats des simulations. À cet effet, les simulations ont été étendues à 31 ans (1983-2013) afin d'examiner le comportement des différents traitements dans un environnement changeant d'une année à l'autre et dont le déterminisme est encore mal connu pour le type de sol utilisé. Autrement dit, il s'agit de voir l'effet à long terme des traitements sur les rendements grain du mil dans un contexte de variabilité climatique.

Les figures 18 et 19 représentent la variabilité du rendement grain simulé sur la période de 31 ans issue de l'analyse biophysique, respectivement au niveau des systèmes mil continu et mil en rotation avec le niébé (annexe XI) et du système mil en association avec le niébé (annexe XII). Il ressort que les rendements grain varient en fonction des niveaux de résidus de récolte, des engrais minéraux et de fumier appliqués d'une année à l'autre. Dans les systèmes mil continu et mil en rotation avec le niébé (figure 18), les traitements T1, T2, T3, T10, T11, T12, T19, T20 et T21 présentent moins de variabilité sur la période 1983-2013 car les boîtes à moustache sont moins étalées. Le traitement T1 (R0F0M0) représente le témoin de l'essai. Il en découle après analyse statistique (moyenne, écart-type, coefficient de variation) que le traitement T19 (R2F0M0) présente la plus faible variabilité sur la période de 31 ans avec un rendement grain de 647 kg/ha en moyenne.

Dans le système mil en association avec le niébé (figure 19), ce sont les traitements T1, T2, T10, T11, T19 et T20 qui présentent moins de variabilité. La comparaison de ces traitements permet de retenir les traitements T19 (R2F0M0) et T20 (R2F0M1) comme étant ceux qui présentent les plus faibles variabilités sur la période de 31 ans avec des rendements grain moyens de 610 kg/ha et 655 kg/ha respectivement.

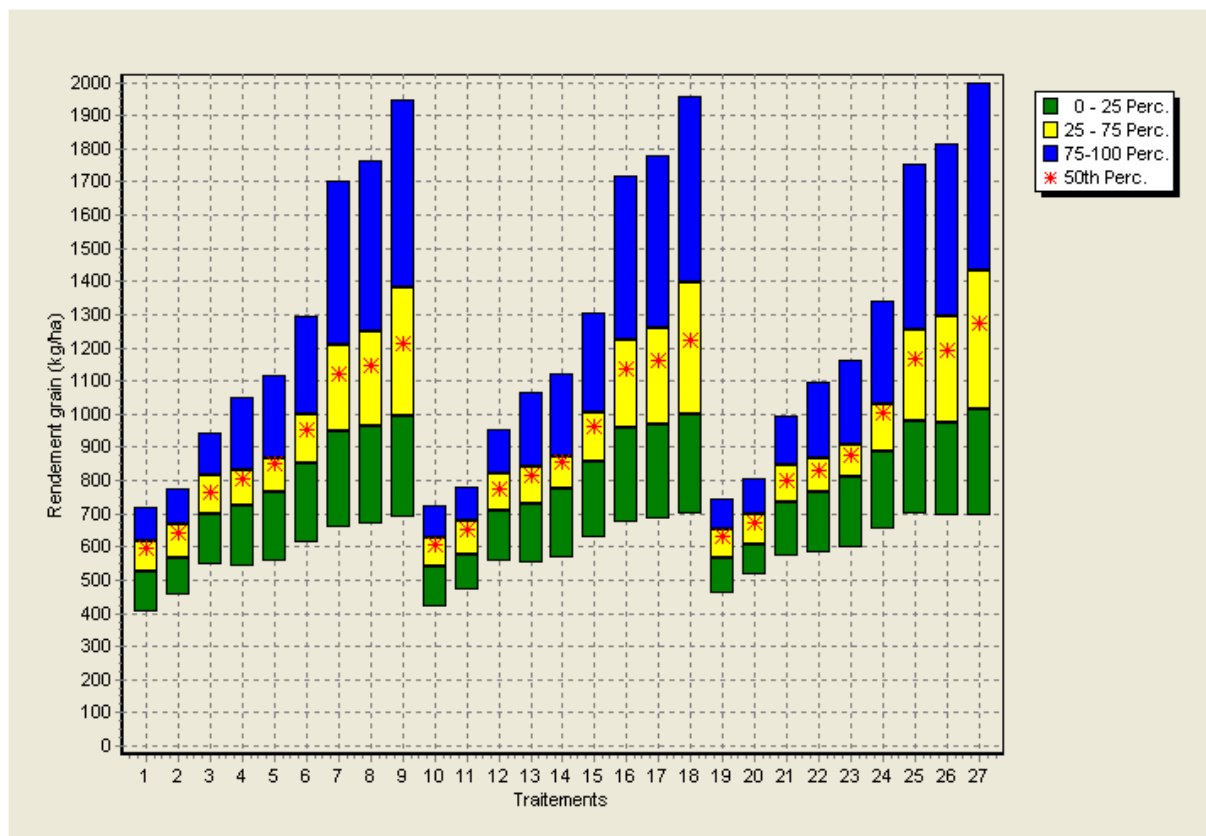
L'analyse stratégique et financière relative au revenu monétaire du mil par hectare avec l'efficacité des différents traitements durant la période de 1983 à 2013 révèle que le traitement R0F2M0 présente le meilleur revenu monétaire par hectare et la meilleure efficacité dans les trois systèmes de culture (tableaux XIII et XIV).



N.B : 1 = R0F0M0 ; 2 = R0F0M1 ; 3 = R0F0M2 ; 4 = R0F1M0 ; 5 = R0F1M1 ; 6 = R0F1M2 ; 7 = R0F2M0 ; 8 = R0F2M1 ; 9 = R0F2M2 ; 10 = R1F0M0 ; 11 = R1F0M1 ; 12 = R1F0M2 ; 13 = R1F1M0 ; 14 = R1F1M1 ; 15 = R1F1M2 ; 16 = R1F2M0 ; 17 = R1F2M1 ; 18 = R1F1M2 ; 19 = R2F0M0 ; 20 = R2F0M1 ; 21 = R2F0M2 ; 22 = R2F1M0 ; 23 = R2F1M1 ; 24 = R2F1M2 ; 25 = R2F2M0 ; 26 = R2F2M1 ; 27 = R2F2M2.

Perc. = quartile

Figure 13 : Variabilité du rendement grain simulé en fonction des traitements sur une période de 31 ans (systèmes mil continu et mil en rotation avec le niébé)



N.B : 1 = R0F0M0 ; 2 = R0F0M1 ; 3 = R0F0M2 ; 4 = R0F1M0 ; 5 = R0F1M1 ; 6 = R0F1M2 ; 7 = R0F2M0 ; 8 = R0F2M1 ; 9 = R0F2M2 ; 10 = R1F0M0 ; 11 = R1F0M1 ; 12 = R1F0M2 ; 13 = R1F1M0 ; 14 = R1F1M1 ; 15 = R1F1M2 ; 16 = R1F2M0 ; 17 = R1F2M1 ; 18 = R1F1M2 ; 19 = R2F0M0 ; 20 = R2F0M1 ; 21 = R2F0M2 ; 22 = R2F1M0 ; 23 = R2F1M1 ; 24 = R2F1M2 ; 25 = R2F2M0 ; 26 = R2F2M1 ; 27 = R2F2M2.

Perc. = quartile

Figure 14 : Variabilité du rendement grain simulé en fonction des traitements sur une période de 31 ans (système mil en association avec le niébé)

Tableau XIII : Analyse stratégique et financière des différents traitements sur 31 ans (système mil continu et système mil en rotation avec le niébé)

Traitements	E (x)	E (x) - F (x)	Efficient
R0F0M0	104 176	96 496	No
R0F0M1	105 966	97 652	No
R0F0M2	111 076	100 181	No
R0F1M0	128 508	115 127	No
R0F1M1	128 919	114 643	No
R0F1M2	129 472	111 518	No
R0F2M0	176 577	147 147	Yes
R0F2M1	175 341	144 401	No
R0F2M2	170 910	134 573	No
R1F0M0	98 461	90 763	No
R1F0M1	100 474	92 152	No
R1F0M2	105 660	94 679	No
R1F1M0	122 923	109 350	No
R1F1M1	123 239	108 797	No
R1F1M2	123 973	105 855	No
R1F2M0	171 037	141 553	No
R1F2M1	169 708	138 592	No
R1F2M2	164 871	128 265	No
R2F0M0	81 836	74 283	No
R2F0M1	84 074	75 756	No
R2F0M2	89 250	77 949	No
R2F1M0	105 500	91 574	No
R2F1M1	106 133	91 061	No
R2F1M2	106 774	88 206	No
R2F2M0	153 717	123 594	No
R2F2M1	152 419	120 629	No
R2F2M2	146 575	108 658	No

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

F(x) = Coefficient de Gini

Source : DSSAT

Tableau XIV : Analyse stratégique et financière des différents traitements sur 31 ans (système mil en association avec le niébé)

Traitements	E (x)	E (x) - F (x)	Efficient
R0F0M0	96 955	88 917	No
R0F0M1	98 051	89 622	No
R0F0M2	101 205	90 352	No
R0F1M0	118 447	105 739	No
R0F1M1	118 302	104 572	No
R0F1M2	117 936	100 333	No
R0F2M0	164 267	134 809	Yes
R0F2M1	162 481	131 519	No
R0F2M2	158 356	121 961	No
R1F0M0	91 376	83 445	No
R1F0M1	92 640	84 234	No
R1F0M2	95 781	84 789	No
R1F1M0	112 968	100 110	No
R1F1M1	112 896	99 117	No
R1F1M2	112 416	94 753	No
R1F2M0	158 864	129 352	No
R1F2M1	157 139	126 079	No
R1F2M2	152 526	115 712	No
R2F0M0	74 509	66 814	No
R2F0M1	75 961	67 650	No
R2F0M2	79 191	67 817	No
R2F1M0	95 687	82 677	No
R2F1M1	95 847	81 531	No
R2F1M2	95 379	77 252	No
R2F2M0	141 222	111 100	No
R2F2M1	139 621	107 340	No
R2F2M2	134 610	96 283	No

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

F(x) = Coefficient de Gini

Source : DSSAT

Chapitre 4 : Discussion

L'étude a porté sur l'impact de la variabilité climatique sur les effets à long terme de l'application combinée du fumier, des résidus de récolte et des engrais minéraux sur la productivité du mil en zone sahélienne du Niger en utilisant des données agronomiques et climatiques historiques. L'originalité de la méthodologie réside dans l'utilisation d'un modèle de simulation des cultures en complément d'une expérimentation conduite de 1998 à 2013 au Centre Sahélien de l'ICRISAT, Sadoré (Niger).

4.1. Effet à long terme des traitements sur les rendements grain du mil

À travers l'analyse des résultats de l'expérimentation, il apparaît clairement que le rendement grain de mil est très variable d'une année à l'autre sur la période 1998-2013 quel que soit le système de culture considéré. L'effet de l'année est souvent observé dans les expériences agricoles au Sahel et est dans une large mesure induite par la pluviométrie (Christianson *et al.*, 1990 ; Sivakumar et Salaam, 1999 ; Gandah *et al.*, 2003a). Wang *et al.* (2007) avaient également constaté un effet d'année sur les rendements grains de maïs dans une expérience à long terme dans le Nord de la Chine combinant tiges de maïs, engrais N et P et le fumier de bovins, qui a été attribuée à l'effet de la pluviométrie au cours de la saison de croissance et la teneur en eau du sol au moment du semis.

Au cours de la période 1998-2013, l'interaction résidus, engrais et fumier a produit des effets très hautement significatifs sur le rendement grain du mil dans les trois systèmes de culture. Ces résultats confirment une fois de plus les conclusions sur les avantages de la combinaison des engrais minéraux et des matières organiques (résidus et fumier) dans l'amélioration du rendement de mil (Bationo *et al.*, 1986 ; Joly, 1989 ; Bationo *et al.*, 1991 ; Mkwunye, *et al.*, 1995 ; Pieri, 1997). Pour chacune des combinaisons d'applications, l'effet le plus marquant a été celui correspondant au niveau 2 des facteurs. Dans le système mil continu, la combinaison R2F2M1 (2700R, 45N+13,1P, 300M) a permis d'enregistrer le meilleur rendement grain par rapport au témoin R0F0M0 (300R, 0N+0P, 300M).

Dans les systèmes mil en rotation avec le niébé et mil en association avec le niébé, les meilleurs rendements grain sur la période 1998-2013 ont été obtenus avec l'application du traitement R2F2M2 (2700R, 45N+13,1P, 2700M) comparativement au témoin. Ceci confirme les résultats antérieurs de la recherche qui ont montré que les engrais augmentent les rendements du mil (Bationo, 1991 ; Buerkert, 1995 ; Hassane, 1996).

On a constaté que les interactions R0 (300R) + Engrais + Fumier induisent un rendement grain plus important que les interactions Résidus + Engrais + M0 (300M). Ceci pourrait s'expliquer

par le fait que la minéralisation du fumier est beaucoup plus rapide que celle des résidus (Buerkert, 1995).

La performance du système mil en rotation avec le niébé comparativement aux autres systèmes de culture sur les 16 années d'expérimentation pourrait s'expliquer par l'arrière effet du niébé pour la culture de mil (Bado, 2002). Ce constat montre l'avantage des rotations culturales dans l'amélioration des rendements du mil. Les effets bénéfiques des légumineuses sur les rendements des cultures subséquentes ont en effet, été observés par plusieurs auteurs (Peoples et Crasswell, 1992 ; Peoples *et al.*, 1995 ; Wani *et al.*, 1995 ; Chalk, 1998 ; Bationo et Ntare, 2000 cités par Bado, 2002). Peoples et Crasswell (1992) cités par Bado (2002) notent que dans les systèmes céréales-légumineuses, les précédents légumineuses peuvent augmenter les rendements de la céréale subséquente de 50 à 350%. Bationo *et al.* (1991a) ont trouvé que le précédent niébé augmentait les rendements du mil de 58 à 100%.

Les faibles rendements grain enregistrés dans le système mil en association avec le niébé comparativement au système mil continu pourraient s'expliquer par la concurrence entre niébé et mil, pour l'humidité et les éléments nutritifs. Les travaux de Thibault (2001) ont en effet, montré que lorsque les ressources vitales sont limitées, la concurrence entre les plants diminue le rendement individuel de chaque plant.

4.2. Facteurs climatiques et stades de développement du mil

L'analyse des températures de l'air au cours de la période d'expérimentation n'a pas montré de corrélation directe entre celles-ci et les productions en grain par année.

Concernant la radiation solaire du C.S.I sur la période 1998-2013, on n'a pas distingué d'année particulière ; la tendance est la même avec celle des températures.

On a constaté également que la production en grain de mil n'est pas nécessairement proportionnelle à la quantité de pluie tombée au cours de l'année. Naturellement pour toute culture pluviale, il est nécessaire d'enregistrer une quantité appropriée de pluie. Cependant, les facteurs pluviométriques comme la répartition de la pluie dans le temps ont un impact plus direct sur la production. Ces résultats sont similaires à ceux de Barron *et al.* (2003) qui ont montré que les échecs de récolte sont plus généralement dus à la variabilité de la distribution des pluies au cours de la saison qu'à un réel déficit du cumul annuel.

Des pluviométries mensuelles et nombre de jours de pluie similaires n'ont pas entraîné les mêmes productions et ce constat est aussi valable pour des longueurs de saison similaires.

Pour les variétés locales de mil ayant un cycle d'environ 110 à 120 jours, le remplissage des graines commence autour de 70-80 JAS. Un déficit pluviométrique pendant cette période

entraînerait des perturbations du cycle et par conséquent une baisse de la production en grain. À l'ICRISAT, des recherches faites sur la croissance des grains de plusieurs variétés de mil en condition de sécheresse au stade post-floraison ont montré une réduction du poids final du grain de 22% en 1988 et 27% en 1989 (ICRISAT, Rapport annuel 1990). Les traitements sous stress ont aussi montré une réduction de la période de remplissage des grains par rapport aux autres sous des conditions optimales d'eau.

L'analyse de la répartition de la pluviométrie en fonction des stades de développement du mil a donné plus de détails quant aux différences de production entre années sur la période 1998-2013. En comparant l'année de bonne production de mil (1999) à celle de mauvaise production (2007), on a constaté que la particularité entre ces deux années était la bonne répartition de la pluie en fonction des stades de développement du mil en 1999 qu'en 2007.

Finalement, la mauvaise distribution de la pluviométrie au cours des campagnes hivernales sur la période 1998-2013, *toute chose étant égale par ailleurs* est l'une des causes de la variation de rendement grain entre années. En effet, le parallélisme entre les variations de la pluviométrie et celles des rendements a été maintes fois décrit par les bioclimatologues et les agronomes. Ainsi, Dancette (1978) cité par Diouf (1990) explique la variabilité des rendements moyens de mil par l'importance des écarts de la pluviométrie à la normale et à la quantité de pluie utile. Un déficit hydrique a un effet défavorable sur le rendement (Bationo, 1991 ; Mokwunye, 1991). Cela s'appuie fort bien en comparant des rendements obtenus sous différentes pluviométries. Ce déficit hydrique survenu pendant la phase critique de floraison du mil a provoqué sur la plupart des plants de mil l'avortement des fleurs avec une chute importante surtout au niveau des parcelles peu fumées en engrais et matière organique (fumier et résidus).

Concernant les stress hydrique et azoté, les simulations à l'aide du modèle DSSAT ont montré que sur toutes les années (bonnes ou mauvaises), le stress hydrique n'a jamais concerné les parcelles témoins (R0F0M0) qui reflètent la pratique paysanne en général. Ceci pourrait être lié à la faible production de biomasse dans le témoin alors que la biomasse produite devient plus importante avec l'application des engrais. Le stress azoté pour le témoin se déclare à partir des 20 JAS pour s'étaler sur presque toute la durée du cycle. Ce constat vient confirmer que dans la pratique paysanne, l'eau (pluviométrie) n'est pas le seul facteur limitant et que le manque d'engrais (fertilisants) limite plus la production que l'eau. Des recherches à l'ICRISAT (ICRISAT, Rapport annuel 1985) ont en effet démontré que dans les zones arides du Sahel où la pluviométrie est supérieure à 300 mm, les facteurs les plus limitatifs pour la production agricole sont plus les nutriments que l'eau. Ainsi à Sadoré où la moyenne annuelle des pluies est de 560 mm, la non-utilisation d'engrais a entraîné un rendement de 1,24 kg de grain de mil

par mm d'eau alors que l'utilisation d'engrais a donné un rendement de 4,14 kg de grain de mil par mm d'eau (Bationo *et al.*, 2006).

Sur les autres traitements de l'essai, les stress hydriques se manifestent pendant les périodes sèches mais durent moins que les stress azotés qui eux-mêmes disparaissent autour des 80 JAS pour certaines années et pour d'autres, jusqu'à la fin du cycle. Selon Sivakumar (1991), en Afrique de l'Ouest, les risques de sécheresse sont étroitement associés à la pluviométrie annuelle moyenne. Lorsque la pluviométrie augmente, les fréquences de courtes périodes sèches s'accroissent et celles de longues périodes sèches diminuent.

En général, les périodes sèches sont plus fréquentes au stade d'initiation paniculaire qu'au stade de floraison, particulièrement dans les régions où la pluviométrie est faible. Les périodes sèches deviennent progressivement plus longues au stade de remplissage des grains. Dans les régions moins pluvieuses, ceci survient beaucoup plus tôt.

Le stress hydrique du traitement extrême R2F2M2 reste très élevé lorsque la pluviométrie est mauvaise. De plus, les quantités importantes de pluie (> 40 mm) enregistrées en début de cycle et entre 40 et 60 JAS au cours des années 2000, 2006, 2011 et 2012 peuvent également entraîner des pertes par lessivage de l'azote apporté. Bationo *et al.* (1995) et Abdou *et al.* (2012) démontrent que le mil répond très bien aux engrais azotés et que cette réponse est fortement corrélée avec la pluviométrie. Ainsi l'efficacité de l'azote est de 15 kg de grain de mil obtenu par kilogramme d'azote à la dose de 30 kg N/ha lorsque la pluviométrie est bonne.

Par contre, lorsqu'elle est mauvaise, on n'observe pas d'effets significatifs. Selon Diouf (2000), lorsque la pluviométrie est faible et mal répartie, les traitements avec application élevée des engrais sont particulièrement très affectés. En effet, le déficit hydrique diminue la disponibilité de l'azote minéral du sol et le grain est d'autant plus affecté par le déficit hydrique que sa nutrition azotée est bonne (Diouf, 2000). C'est pour cette raison que Gandah *et al.* (2003) conseillent d'adapter les taux d'application de l'engrais azoté selon la pluviométrie.

4.3. Performance du modèle DSSAT

Les résultats obtenus à l'issue de la simulation par le modèle DSSAT ont montré que les rendements grain sont fonction des niveaux d'application des traitements (0, 1, 2).

Dans le système mil continu, le modèle a généralement sous-estimé les rendements grain pour les années 1998, 1999, 2000, 2001, 2002, 2003, 2004, 2005, 2006, 2007, 2009, 2010, 2012 et 2013 malgré la forte corrélation ($R^2 > 0,50$) qui existe entre simulations et mesures, exceptée en 2005, 2009, 2012 et 2013. Ces résultats sont en conformité avec la méthode d'évaluation de la performance du modèle donnée par Wilmott *et al.* (1985) et Wallach et Goffinet (1987). De

plus, l'erreur moyenne normalisée de prédiction NRMSE entre les rendements observés et simulés est supérieure à 30% pour ces années. La performance du modèle est alors mauvaise selon la méthode d'évaluation de la performance du modèle proposée par Jamieson *et al.* (1991) et Loague et Green (1991). Par contre, en 2008 et 2011, la NRMSE pour l'ensemble des traitements est égale à 29%. La performance du modèle est jugée acceptable.

Dans le système mil en rotation avec le niébé, les rendements grain ont été sous-estimés par le modèle pour toutes les années excepté en 2011. Pourtant, malgré le degré de sous-estimation globale du rendement grain, il existe une forte corrélation entre simulations et mesures ; les valeurs de R^2 sont supérieures à 0,50 excepté celles de 2000, 2005, 2008, 2009, 2010, 2011 et 2012 (Wilmott *et al.*, 1985 ; Wallach et Goffinet, 1987). L'erreur moyenne normalisée de prédiction NRMSE du rendement grain pour tous les traitements est supérieure à 30%, et par conséquent le modèle n'a pas été assez performant dans la simulation du rendement grain (Jamieson *et al.*, 1991 ; Loague et Green, 1991). Cependant, en 2011, le modèle montre une performance jugée acceptable dans la prédiction du rendement grain ; la NRMSE est de 27%.

En ce qui concerne, le système mil en association avec le niébé, les résultats de l'évaluation de la performance du modèle ont montré des rendements grains sous-estimés pour l'ensemble des années hormis ceux de 2011 pour lesquels il y'a eu une surestimation. Cependant, le modèle indique de fortes corrélations entre simulations et mesures ($R^2 > 0,50$) malgré le degré de sous-estimation du rendement grain pour les années 1998, 1999, 2000, 2002, 2003 et 2007 (Wilmott *et al.*, 1985 ; Wallach et Goffinet, 1987).

La NRMSE en 2011 est égale à 26%. La performance du modèle est donc acceptable (Jamieson *et al.*, 1991). Pour les autres années, les valeurs de la NRMSE sont supérieures à 30% et par conséquent, le modèle n'est pas jugé performant dans la simulation du rendement grain (Jamieson *et al.*, 1991 ; Loague et Green, 1991).

Cependant, d'une manière globale, on peut remarquer que le modèle est très sensible aux doses des facteurs, notamment les traitements présentant le niveau 2 d'application. En effet, la simulation des rendements grain pour les traitements ayant peu ou pas d'engrais en particulier N a été mauvaise par rapport aux traitements ayant un taux d'engrais élevé (Nurredeen, 2011). Ces résultats sont également soutenus par ceux de Bationo (1991), Buerkert (1995) et Hassane (1996) qui ont montré que les engrais procurent le plus haut rendement par rapport au fumier et aux résidus et ceci l'est d'autant plus que l'on se situe au niveau 2 (45N+13,1P) d'application des engrais.

En conclusion, on retiendra que malgré la prise en compte des facteurs hydrique et azoté, des écarts importants ont été constatés entre rendements simulés et observés. Le modèle DSSAT a

sous-estimé les rendements grain de plusieurs années d'expérimentation sur la période 1998-2013 dans les trois systèmes de culture. Normalement, le modèle a été développé sur la base que tous les apports soient pris en compte dans des conditions optimales comme s'il n'y avait pas de facteur limitatif autre que l'élément simulé. Malheureusement, le module phosphore n'était pas inclus dans la version du modèle DSSAT que nous avons utilisé. En effet, CERES-Millet ne prend pas en compte spécifiquement le phosphore, mais le fait à travers le SLPF qui représente l'effet de la fertilité globale, au-delà de l'azote, sur la croissance journalière de biomasse. Le phosphore, comme on le sait, est l'un des facteurs limitants les plus importants au Sahel et dont la déficience affecte selon Bationo et Mokwunye (1991) et Smithson et Giller (2002) plus de 40% des sols. Ce qui explique pourquoi c'est seulement l'effet de l'azote qui a été simulé. Le cas de l'azote seul ne suffit pas pour donner des résultats proches de la réalité.

Le manque de phosphore dans un sol ne permet pas à l'azote de jouer pleinement son rôle comme l'indiquent les rendements. Buerkert *et al.* (2001) ont en effet, montré qu'il n'y avait pas de réponse positive à N sans une fourniture adéquate de P. L'azote, le fumier et les résidus sont aussi efficaces, surtout lorsqu'ils sont en combinaison avec le phosphore comme l'attestent les résultats de plusieurs années de recherche de Bationo *et al.* (2006).

Les biais dans les prédictions des rendements pourraient également être imputables, en partie dus à des facteurs biotiques (insectes, maladies, adventices) et à la non simulation par le modèle des effets du niébé sur le mil dans le cas de la rotation ou de l'association. Cette étude n'a pas pris en compte ces éléments et ne permet donc pas une analyse qui pourrait dissocier les effets de ces facteurs biotiques dans l'explication des écarts de rendement. Mais Affholder (1994) en a fait cas, en identifiant la compétition avec les mauvaises herbes comme un important facteur limitant en conditions de pluviométrie à priori satisfaisante.

Les pertes occasionnées par lessivage de l'azote peuvent également expliquer pourquoi le modèle ne simule pas bien les rendements grain pour plusieurs années.

4.4. Evaluation pluriannuelle des traitements (analyse saisonnière)

L'analyse biophysique a montré que l'application du traitement R2F0M0 (2700R, 0N+0P, 300M) présente la plus grande stabilité du point de vue variabilité climatique sur la période 1983-2013 dans les systèmes mil continu et mil en rotation avec le niébé. Par contre, dans le système mil en association avec le niébé, la simulation à long terme sur 31 ans a montré que les combinaisons R2F0M0 (2700R, 0N+0P, 300M) et R2F0M1 (2700R, 0N+0P, 900M) améliorent à la fois la moyenne à long terme et la garantie d'un rendement minimum sans augmentation de la variabilité interannuelle par rapport au témoin.

En comparant ces résultats avec ceux de la recherche, on constate que ces deux traitements ne contiennent pas d'engrais minéraux par rapport aux doses recommandées (30 kg N/ha, 13 kg P/ha) (Christianson *et al.*, 1990 ; Bationo *et al.*, 1992). Cependant, ils semblent plus appropriés pour les petits agriculteurs dans la mesure où ils garantissent un rendement minimum plus élevé dans les années de mauvaises conditions climatiques et une variabilité interannuelle plus faible ; ce qui permet de réduire leur vulnérabilité.

L'analyse stratégique et financière recommande la combinaison R0F2M0 (300R, 45N+13,1P, 300M) comme le traitement présentant le meilleur revenu monétaire par hectare et la meilleure efficacité dans les trois systèmes de culture sur la période 1983-2013.

Conclusion et recommandations

L'objectif global de cette étude était d'évaluer l'impact de la variabilité climatique sur les effets à long terme de l'application combinée du fumier, des résidus de récolte et des engrais minéraux sur la productivité du mil en zone sahélienne du Niger.

Les résultats obtenus ont montré que le traitement R2F2M1 (2700R, 45N+13,1P, 300M) permet d'enregistrer à long terme le meilleur rendement grain par rapport au témoin R0F0M0 (300R, 0N+0P, 300M) dans le système mil continu. Dans les systèmes mil en rotation avec le niébé et mil en association avec le niébé, les meilleurs rendements grain sur la période 1998-2013 ont été obtenus avec l'application du traitement R2F2M2 (2700R, 45N+13,1P, 2700M).

À travers les simulations avec le modèle DSSAT, il ressort que les parcelles sous application des traitements sont les plus affectées par les stress hydriques. Durant les 16 années d'expérimentation, les rendements ont considérablement augmenté par l'amélioration de la fertilité et à aucun moment le témoin R0F0M0 n'a manifesté des stress hydriques malgré les périodes sèches au cours des différentes années. C'est dire que les pluviométries enregistrées chaque année ne constituent pas à elles seules un handicap majeur à la production avec le traitement témoin et que même pour les traitements améliorés où les stress hydriques interviennent, la production s'est nettement améliorée. Il est donc clair que dans la plupart des cas, la baisse de la fertilité limite plus la production du mil que la pluviométrie. Le traitement témoin est constamment déficitaire même lorsque les conditions climatiques sont favorables. Il apparaît aussi qu'autant en bonne année qu'en mauvaise année, la baisse des rendements sous tous les traitements est liée principalement au stress hydrique qui intervient pendant les stades de floraison et surtout de remplissage des grains. Or c'est principalement le mois de septembre qui est souvent soumis à ce déficit pluviométrique car les mois le précédant sont généralement pluvieux.

Les simulations ont montré des rendements grain nettement inférieurs à ceux mesurés en raison du fait que le modèle ne simule pas le phosphore qui constitue l'élément le plus limitant de la fertilité du sol et le plus important pour la culture du mil.

La performance de prédiction du modèle a été en générale mauvaise pour plusieurs années de la période 1998-2013. Par contre, pour d'autres, la performance du modèle a été acceptable. L'application du modèle à l'évaluation pluriannuelle de la production en grain a permis de représenter quantitativement le risque agroclimatique sur la culture de mil en zone sahélienne du Niger.

L'analyse biophysique à partir du module analyse saisonnière du modèle DSSAT a indiqué que le traitement R2F0M0 (2700R, 0N+0P, 300M) présente moins de risque en termes de variabilité climatique pour le producteur dans les systèmes mil continu et mil en rotation avec le niébé. Par contre, dans le système mil en association avec le niébé, ce sont les combinaisons R2F0M0 (2700R, 0N+0P, 300M) et R2F0M1 (2700R, 0N+0P, 900M) qui présentent les plus faibles risques. Cependant, l'analyse stratégique et financière préconise la combinaison R0F2M0 (300R, 45N+13,1P, 300M) comme le traitement le plus stable sur le plan agroéconomique dans les trois systèmes de culture sur la période 1983-2013.

Il est vrai qu'il n'est pas possible de contrôler le climat à notre guise, mais il faut adapter les méthodes culturales à la disponibilité des ressources naturelles. Si la production du mil connaît encore des difficultés au Niger, c'est parce que les techniques culturales pratiquées ne sont pas adaptées aux nouvelles conditions climatiques moins favorables qu'il y a des décennies. Le cas de l'azote seul ne suffit pas pour donner des résultats proches de la réalité. C'est pourquoi cette étude doit être complétée par l'apport de solutions aux problèmes identifiés dans la structure du modèle. Il s'agit des problèmes liés à la non prise en compte du phosphore qui constitue un élément important pour la culture du mil et par conséquent, entraîne une sous-estimation du rendement grain, à la non prise en compte de l'effet résiduel du niébé dans les systèmes de culture. Enfin, il y a le problème de la forte sensibilité du modèle à la teneur en azote du sol qui résulte certainement du fait que certains modules du modèle CERES-Millet dérivent de CERES-Maize. Le maïs est en effet beaucoup plus sensible au stress azoté que le mil. Des discussions sont en cours avec l'équipe de DSSAT à Gainsville en Floride au États-Unis (<http://dssat.net/>) pour récupérer le code afin de tenter d'apporter des solutions à ces problèmes dans prochaine version du modèle (DSSAT 4.6).

Il serait aussi intéressant d'étendre la zone d'étude sur d'autres localités pour avoir une gamme de conditions physiques et climatiques assez variables afin d'en tirer des résultats définitifs nécessaires à la validation des recommandations de fertilisation.

Références bibliographiques

- Abdou, A., Koala, S. and Bationo, A. 2012.** Long-term soil fertility trials in Niger, West Africa, *In: Bationo, A., Waswa, B., Kihara, J., Adolwa, L., Vanlauwe, B., Saidou, K. (Eds.), Lessons learned from long-term soil fertility management experiments in Africa, Springer, pp105-120.*
- Abdoulaye, T. and Lowenberg-Deboer, J. 2000.** Intensification of Sahelian Farming Systems: Evidence from Niger. *Agricultural Systems, 64:67–81.*
- Abdoulaye, T. and Sanders, J. H. 2005.** Stages and Determinants of Fertilizer Use in Semiarid African Agriculture: the Niger Experience. *Agricultural Economics, 32:167–179.*
- Adden K.A., 2005.** Estimation des besoins en Azote, Phosphore et Potassium du Basilic (*Ocimum basilicum L.*) par le Module DSSB et gestion optimale de l'Azote dans la région Maritime du Togo. Mémoire d'ingénieur agronome, IFDC Afrique/ESA -UL, Lomé, Togo, 65 pages.
- Affholder, F. 1997.** Empirically modelling the interaction between intensification and climatic risk in semiarid regions. *Field Crops Research, 52:79–93.*
- Alagarswamy, G. ; Reddy, D.M. and Swaminathan, G., 1998.** Duration of the photoperiod-sensitive phases of time to panicle initiation in sorghum. *Field Crops Research 55 : 1-10.*
- Badameli, K.S.M., 1996.** La variabilité climatique et la production agricole au Togo. Thèse, Université de Bordeaux, 343 pp.
- Bado, B. V., 2002.** Rôle des légumineuses sur la fertilité des sols ferrugineux tropicaux des zones guinéenne et soudanienne du Burkina Faso. Thèse de Doctorat. Université Laval, Canada, 197 pages.
- Bagayoko, M., Buerkert, A., Lung, G., Bationo, A., and Romheld, V. 2000.** Cereal/Legume Rotation Effects on Cereal Growth in Sudano-Sahelian West Africa: Soil Mineral Nitrogen, Mycorrhizae and Nematodes. *Plant and Soil, 218:103–116.*
- Baron, C., B. Sultan, M. Dingkuhn, B. Muller, S.B. Traoré, A. Alhassane et M. Zouzou. 2009.** Adaptation and evaluation of the SARRA-H crop model for agricultural yield forecasting in West Africa. Third International AMMA Conference, July 20—24, African Monsoon Multidisciplinary Analyses, Ouagadougou, Burkina Faso.
- Bationo, A. ; Christianson, C.B. and Mkwunye, A.U., 1986.** Soil fertility management of the millet production sandy soils of Sahelian West Africa: The Niger experience in Soil, Crop and Water Management in the Sudano-Sahelian zone ICRISAT/INRAN.
- Bationo, A., Christianson, C. B., and Baethgen, W. E. 1990b.** Plant-Density and Nitrogen-Fertilizer Effects on Pearl-Millet Production in Niger. *Agronomy Journal, 82:290–295.*
- Bationo, A. and Mkwunye, A. U. 1991a.** Alleviating Soil Fertility Constraints to Increased Crop Production in West Africa - the Experience in the Sahel. *Fertilizer Research, 29:95–115.*
- Bationo, A. and Mkwunye, A. U. 1991b.** Role of manures and crop residue in alleviating soil fertility constraints to crop production: With special reference to the Sahelian and Sudanian zones of West Africa. *Fertilizer Research, 29:117–125.*
- Bationo, A., Mkwunye, A. U. 1991.** Role of manures and crop residue in alleviating soil fertility constraints to crop production: with special reference to the Sahelian and Sudanian zone of West Africa. *Fert. Res. 29, 117-125.*

- Bationo, A., Christianson, C. B., Baethgen, W. E., and Mokwunye, A. U. 1992.** A Farm-Level Evaluation of Nitrogen and Phosphorus-Fertilizer Use and Planting Density for Pearl-Millet Production in Niger. *Fertilizer Research*, 31:175–184.
- Bationo, A., Christianson, C. B., and Klaij, M. C., 1993.** The Effect of Crop Residue and Fertilizer Use on Pearl-Millet Yields in Niger. *Fertilizer Research*, 34:251–258.
- Bationo, A. and Buerkert, A. 2001.** Soil Organic Carbon Management for Sustainable Land Use in Sudano-Sahelian West Africa. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 61:131–142.
- Bationo, A., Buerkert, A., Sedogo, M. P., Christianson, B. C., and Mokwunye, A. U. 1995.** A critical review of crop-residue use as soil amendment in the West African semi-arid tropics. In Powell, J. M., Fernandez-Rivera, S., Williams, T. O., and Renard, C., editors, *Livestock and sustainable nutrient cycling in mixed farming systems of sud-Saharan Africa. Vol II: technical papers, Proceedings of an international conference held in Addis Abeba, Ethiopia, 22-26 Nov 1993*, pages 305–322. ILCA, SGPR.
- Bationo, A., Lompo, F., and Koala, S. 1998.** Research on Nutrient Flows and Balances in West Africa: State-of-the-Art. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 71:19–35.
- Bationo, A. and Ntare, B. R. 2000.** Rotation and Nitrogen Fertilizer Effects on Pearl Millet, Cowpea and Groundnut Yield and Soil Chemical Properties in a Sandy Soil in the Semi- Arid Tropics, West Africa. *Journal of Agricultural Science*, 134:277–284.
- Bationo A., A. Hartemink, O. Lungu, M. Naimi, P. Okoth, E. Smailing and L. Thiombiano, 2006.** Africa soils: Their Productivity and Profitability of Fertilizer Use. Background paper prepared for the African Fertilizer Summit, June 9-13, 2006, Abuja, Nigeria.
- Bationo, A. ; Waswa, B. ; Kihara, J. and Kimetu, J., 2006.** Nutrient cycling in agroecosystems : Advantages in integrated soil fertility management in Sub-saharan Africa : Challenges and opportunities, (Springer, Ed.), Volume 76/2-3 november.
- Bationo, A., Kihara, J., Vanlauwe, B., Waswa, B., Kimetu, J. 2007.** Soil organic carbon dynamics, functions and management in West African agro-ecosystems. *Agric. Syst.* 94, 13-25.
- Ben Mohamed, A., Duivenbooden, N. V., and Abdoussallam, S. 2002.** Impact of Climate Change on Agricultural Production in the Sahel - Part 1. Methodological Approach and Case Study for Millet in Niger. *Climatic Change*, 54:327–348.
- Berger, M., 1990.** La gestion des résidus organiques à la ferme in Savanes d’Afrique, *Terres fertiles ? CIRAD Montpellier*, 1990 p 293-316.
- Bielders, C. L., Michels, K., and Bationo, A., 2002.** On-Farm Evaluation of Ridging and Residue Management Options in a Sahelian Millet-Cowpea Intercrop. 1. Soil Quality Changes. *Soil Use and Management*, 18:216–222.
- Brisson, N. 2009.** Principes et utilité des modèles de culture, In *Modélisation En Biologie Végétale. Comptes rendus de l’Académie d’agriculture de France du 28 janvier 2009*, Académie d’Agriculture de France, Paris, France. 4p.
- Brouwer, J. and Powell, J. M. 1998.** Increasing Nutrient Use Efficiency in West-African Agriculture: the Impact of Micro-Topography on Nutrient Leaching From Cattle and Sheep Manure. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 71:229–239.
- Buerkert, A. and Stern, R. D., 1995.** Effects of Crop Residue and Phosphorus Application on the Spatial Variability of Nondestructively Measured Millet Growth in the Sahel. *Experimental Agriculture*, 31:429–449.

- Buerkert, A., 1995.** Effects of Crop residue, Phosphorus and spatial soil variability on yield and nutrient uptake of Pearl Millet in SouthWest Niger, Wagennigen.272 pages.
- Buerkert, A., Bationo, A., and Piepho, H. P., 2001.** Efficient Phosphorus Application Strategies for Increased Crop Production in Sub-Saharan West Africa. *Field Crops Research*, 72:1–15.
- Christianson, C. B., Bationo, A., Henao, J., and Vlek, P. L. G. 1990.** Fate and Efficiency of N-Fertilizers Applied to Pearl-Millet in Niger. *Plant and Soil*, 125:221–231.
- Conseil National pour un Environnement Durable., 2006.** Programme d'Action National pour l'Adaptation aux Changements Climatiques (PANA).
- De Rouw, A. 2004.** Improving Yields and Reducing Risks in Pearl Millet Farming in the African Sahel. *Agricultural Systems*, 81:73–93.
- De Wit, C., R. Brouwer et F. Penning de Vries. 1970.** The simulation of photosynthetic system, In *Prediction and Measurement of Photosynthetic Productivity. Proceedings of the IBP/PP technical meeting, Třeboň, 14-21 September 1969, Pudoc, Wageningen, The Netherlands.* 632.
- Dielbolt, S. 2006.** Le petit lexique des termes de la complexité [en ligne]. Disponible sur «[http : www. Mcxapc.org/index.php](http://www.Mcxapc.org/index.php)» Consulté le 02/07/2014.
- Diouf, M., 1990.** Analyse de l'élaboration du rendement du mil (*Pennisetum typhoides*). Mise au point d'une méthode de diagnostic en parcelles paysannes. Thèse de Doctorat, Université Libre de Bruxelles, Bruxelles. 160 pages.
- Doztsi A.K., 2002.** Application du modèle CERES-Maize de DSSAT à l'analyse des stratégies de semis pour le maïs (*Zea mays L.*) dans les conditions de SEVE KPOTA. Mémoire d'ingénieur agronome, IFDC Afrique/ESA -UL, Lomé, Togo, 91 pages.
- Du Toit A.S., Booyesen J. and Human H.H., 2001.** Use of Linear regression and a correlation matrix to evaluate CERES 3 (Maize). In: White, J.W., and P.R. Grace (eds), *Modeling extremes of wheat and maize crop performance in the tropics, Proceedings of a workshop. CIMMYT, El Batan (Mexico), 19-22 April 1999, Mexico, D.F. CIMMYT.*
- Esse, P. C., Buerkert, A., Hiernaux, P., and Assa, A. 2001.** Decomposition of and Nutrient Release from Ruminant Manure on Acid Sandy Soils in the Sahelian Zone of Niger, West Africa. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 83:55–63.
- Fatondji, D., Martius, C., Biielders, C. L., Vlek, P. L. G., Bationo, A., and Gérard, B. 2006.** Effect of Planting Technique and Amendment Type on Pearl Millet Yield, Nutrient Uptake, and Water Use on Degraded Land in Niger. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 76:203–217.
- Fechter, J., Allison, B. E., Sivakumar, M. V. K., Ploeg, R. R. V. D., and Bley, J. 1991.** Evaluation of the SWATRER and CERES-Millet models for southwest Niger. *IAHS Publication (International Association of Hydrological Sciences)*, pages 505–513.
- Fofana, B., M.C.S. Woperies, A. Bationo, H. Breman, A. Tamelokpo, D. Gnakpenou, K. Ezui, Z. Zida, and A. Mando, 2006.** Millet nutrient use efficiency as affected by inherent soil fertility in the West African Sahel.
- Fox, P. et Rockstrom, J., 2002.** Supplemental irrigation for dry-spell mitigation of rainfed agriculture in the Sahel. *Agricultural Water Management* 61: 29–50.
- Fussell, L. K., Serafini, P. G., Bationo, A., and Klaij, M. C. 1987.** Management practices to increase yield and yield stability of pearl millet in Africa. In *International Pearl Millet workshop. Proceedings of an international workshop. ICRISAT, Patancheru, AP, India.* pp255-268.

- Gandah, M., Bouma, J., Brouwer, J., Hiernaux, P., and Duivenbooden, N. V. 2003.** Strategies to Optimize Allocation of Limited Nutrients to Sandy Soils of the Sahel: a Case Study from Niger, West Africa. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 94:311–319.
- Gandah, M., Bouma, J., Brouwer, J., Hiernaux, P., and Duivenbooden, N. V. 2003a.** Strategies to Optimize Allocation of Limited Nutrients to Sandy Soils of the Sahel: a Case Study from Niger, West Africa. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 94:311–319.
- Gandah, M., Brouwer, J., Hiernaux, P., and Duivenbooden, N. V. 2003b.** Fertility Management and Landscape Position: Farmers' Use of Nutrient Sources in Western Niger and Possible Improvements. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 67:55–66.
- Gijsman, A. J., Hoogenboom, G., Parton, W. J., and Kerridge, P. C. 2002.** Modifying DSSAT Crop Models for Low-Input Agricultural Systems Using a Soil Organic Matter-Residue Module from CENTURY. *Agronomy Journal*, 94:462–474.
- Gijsman, A.J., G. Hoogenboom, W.J. Parton et P.C. Kerridge. 2002.** Modifying DSSAT Crop Models for Low-Input Agricultural Systems Using a Soil Organic Matter–Residue Module from CENTURY. *Agronomy Journal* 94: 462–474.
- Godwin, D.C. et C.A. Jones. 1991.** Nitrogen Dynamics in Soil-Plant Systems, In *Modeling Plant and Soil Systems*. Hanks J., Ritchie J.T. (eds.). p. 287–321.
- Gomez K.A. and Gomez A.A., 1984.** *Statistical procedures for agricultural research*, 2nd Ed. IRRI. New York: John Wiley and Sons, Inc. 680 p. (Mitchell, 1997).
- Hafner, H., George, E., Bationo, A., and Marschner, H. 1993b.** Effect of Crop Residues on Root-Growth and Phosphorus Acquisition of Pearl-Millet in an Acid Sandy Soil in Niger. *Plant and Soil*, 150:117–127.
- Harris, F. 2002.** Management of Manure in Farming Systems in Semi-Arid West Africa. *Experimental Agriculture*, 38:131–148.
- Hassane, A., 1996.** Effets combinés du fumier, des résidus de récolte et de l'engrais sur la production de mil. Rapport stage Faculté d'Agronomie - ICRISAT, 28 pages.
- Hansen, J.W. 2005.** Integrating seasonal climate prediction and agricultural models for insights into agricultural practice. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 360: 2037–2047.
- Haut-Commissariat à l'Initiative 3N (2012).** Initiative « 3N » pour la sécurité alimentaire et le développement agricole durable « les nigériens nourrissent les nigériens ».
- 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.
- Hoogenboom, G., J.W. Jones, P.W. Wilkens, C.H. Porter, K.J. Boote, L.A. Hunt, U. Singh, J.L. Lizaso, J.W. White, O. Uryasev, F.S. Royce, R. Ogoshi, A.J. Gijsman, G.Y. Tsuji, 2010.** *Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT) Version 4.5 [CD-ROM]*. University of Hawaii, Honolulu, Hawaii.
- Hoogenboom, G., Wilkens, P.W and Tsuji, G.Y (eds.) 1999.** *DSSAT v3*, University Of Hawaii, Honolulu, Hawaii.
- IBSNAT, 1990.** IBSNAT progress report 1987-1990. International Benchmark Site Network for Agrotechnology Transfer, Honolulu, USA. 54p.

- ICRISAT.** Rapport annuel 1985, 1988, 90, 92, 93, 94, 95, 96, 97.
- Jagtap, S. S., Abamu, F. J., and Kling, J. G. 1999.** Long-term assessment of nitrogen and variety technologies on attainable maize yields in Nigeria using CERES-maize. *Agricultural Systems*, 60:77–86.
- Jamieson, P. D. ; Porter, J. R. and Wilson, D. R., 1991.** A test of the computer simulation model ARC-WHEATI on wheat crops grown in New Zealand. *Field Crops Research* 27: 337-350.
- Joly, C., 1987.** Réponses des cultures aux engrais et influence des facteurs agro écologiques sur les rendements dans la zone soudano sahélienne in *Soil, Crop and Water Management in the Sudano sahelian zone ICRISAT*, 1987.
- Jones, J. W. and J. C. Luyten., 1998.** Simulation of Biological Processes. *In: Peart, R. M. and R. B. Curry. Agricultural Systems Modeling and Simulation. The University of FLORIDA. P. 19-62.*
- Jones, C. A. and Kiniry, J.R. 1986.** Ceres-Maize: A simulation model of maize growth and development. Texas. A & M University Press, College Station, Texas, 194 p.
- Jones, J. W., Hoogenboom, G., Porter, C. H., Boote, K. J., Batchelor, W. D., Hunt, L. A., Wilkens, P. W., Singh, U., Gijsman, A. J., and Ritchie, J. T. 2003.** The DSSAT Cropping System Model. *European Journal of Agronomy*, 18:235–265.
- Jones, J., G. Hoogenboom, C. Porter, K. Boote, W. Batchelor, L. Hunt, P. Wilkens, U. Singh, A. Gijsman et J. Ritchie. 2003.** The DSSAT cropping system model. *European Journal of Agronomy* 18: 235–265.
- Kimani, S. K., Nandwa, S. M., Mugendi, D. N., Obanyi, S. N., Ojiem, J., Murwira, H. K., Kimetu, J. M., Mugendi, D. N., Palm, C. A., Mutuo, P. K., Gachengo, C. N., Bationo, A., Klaij, M. C. and Ntare, B. R. 1995.** Rotation and Tillage Effects on Yield of Pearl-Millet (*PennisetumGlaucum*) and Cowpea (*Vigna unguiculata*), and Aspects of Crop Water- Balance and Soil Fertility in a Semiarid Tropical Environment. *Journal of Agricultural Science*, 124:39–44.
- Kimani, S. K., Nandwa, S. M., Mugendi, D. N., Obanyi, S. N., Ojiem, J., Murwira, H. K., and Bationo, A. 2003.** Principles of integrated soil fertility management. In Gichuri, M. P., Bationo, A., Bekunda, M. A., Goma, H. C., Mafongoya, P. L., Mugendi, D. N., Murwira, H. K., Nandwa, S. M., Nyathi, P., and Swift, M. J., editors, *Soil fertility management in Africa: A regional perspective*, pages 51–72. Academy Science Publishers (ASP); Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT); Tropical Soil Biology and Fertility (TSBF), Nairobi, Kenya.
- Kobayashi K. and US Salam M., 2000.** Comparing simulated and measured values using mean squared deviation and its components. *Agronomy Journal* 92: 345 – 352.
- Lamboni D., 2003.** Approche Participative et utilisation du modèle QUEFTS pour la gestion de la fertilité des sols du village de Sévé-Kpota au sud du Togo, Mémoire d'Ingénieur Agronome, UB-ESA, Lomé, Togo, 117 p.
- Lansigan, F. P., W.L. de Los Santos and J.O. Coladilla, 2000.** Agronomic impacts of climate variability on rice production in Philippines. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 28 (2000) 129-137.
- Le Barbé, L. and Lebel, T. 1997.** Rainfall climatology of the HAPEX-Sahel region during the years 1950-1990. *Journal of Hydrology*, 188-189:43–73.
- Loague, K. and Green, R. E., 1991.** Statistical and graphical methods for evaluating solute transport models: overview and application. *Journal of Contaminant Hydrology* 7: 51-73.

- Mahamane, I., 1989.** Méthodes d'application des engrais phosphatés sur le mil et le riz au Niger in Actes du Séminaire National sur l'Aménagement des sols, la conservation de l'eau et la fertilisation, 20-24 Février 1990 INRAN, p 141-147.
- Manu, A., Bationo, A., and Geiger, S. C. 1991.** Fertility Status of Selected Millet Producing Soils of West Africa with Emphasis on Phosphorus. *Soil Science*, 152:315–320.
- Moeller, C., Pala, M., Manschadi, A. M., Meinke, H., and Sauerborn, J. 2007.** Assessing the sustainability of wheat-based cropping systems using APSIM: model parameterization and evaluation. *Australian Journal of Agricultural Research*, 58:75–86.
- Mokwunye, A.U. and Bationo, A., 1991.** Alleviating soil fertility constraints to increase crop production in West Africa: The experience in the Sahel *in Fertilizer Research Vol. 29 (1) in Developments in plants and soil sciences* 244 pages.
- Mokwunye, A.U. et Gerner, H., 1995.** L'utilisation des phosphates naturels pour une agriculture durable en Afrique de l'Ouest 217 p *in Etudes diverses sur les engrais*, n° 12.
- Mokwunye, A.U., Bationo, A., 1991.** Alleviating soil fertility constraints to increase crop production in West Africa: The experience in the Sahel *in Fertilizer Research Vol. 29 (1) in Developments in plants and soil sciences* 244p.
- Nandwa, S., and Kungu, J. B. 2004.** Nitrogen Fertilizer Equivalencies of Organics of Differing Quality and Optimum Combination With Inorganic Nitrogen Source in Central Kenya. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 68:127–135.
- Newman S., Lynch T., and 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.
- Nicou, R., 1986.** Labour et aménagement du sol en vue d'accroître le rendement des cultures vivrières dans les régions semi-arides d'Afrique Subsaharienne *in Food, Grain Production in Semi arid Africa*, SAGFRAD, 1986 p 511-524.
- 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.
- Ooyama, S., 2005.** Farmers' perception for desertification and ecological knowledge for tree planting in the Sahel region of West Africa. Annual report of the Interdisciplinary Research Institute of Environmental Sciences. 24, 51-64.
- Palm, C. A., Myers, R. J. K., and Nandwa, S. M. 1997.** Combined use of organic and inorganic nutrient sources for soil fertility maintenance and replenishment. In Buresh, R. and Sanchez, P., editors, *Replenishing Soil Fertility in Africa*. SSSA Special Publication 51. WI: Soil Science Society of America (SSSA), Madison.
- Papa, A.C., 1986.** La production et la sélection du maïs dans les pays du Sahel *in Food, Grain Production in Semi arid Africa*, SAGFRAD, 1986 p 255-278.
- Parton, W.J., J.W.B. Stewart et C.V. Cole. 1988.** Dynamics of C, N, P and S in grassland soils: a model. *Biogeochemistry* 5: 109–131.
- Payne, W. A. 2000.** Optimizing Crop Water Use in Sparse Stands of Pearl Millet. *Agronomy Journal*, 92:808–814.

- Pichot, J., Sedogo, M.P., Poulain, J.L., et Arrirets, J., 1981.** Evolution de la fertilité d'un sol ferrugineux sous l'influence des fumures minérales et organiques *in* *Agronomie Tropicale*. Vol. 36(1) p 122-133.
- Pieri, C. et Steiner, K., 1997.** L'importance de la fertilité du sol pour une agriculture durable : le cas particulier de l'Afrique *in* *Agriculture + Développement Rural* Vol 1/97 p 23-26
- Pieri, C., 1986.** Fertilisation des cultures vivrières et fertilité des sols en agriculture paysanne subsaharienne *in* *Agronomie Tropicale*, Vol 41(1) p 18.
- Pregitzer, K.S. and J.S. King, 2005.** Effects of Soil Temperature on Nutrient Uptake. *Ecological Studies*, Vol.181.
- Prudencio, C.Y. 1993.** Ring management of soils and crops in West African semi-arid tropics: the case of the Mossi farming system in Burkina Faso, *Agric. Ecosyst. Environ.* 47: 337-264.
- Reardon, T., Kelly, V., Crawford, E., Diagana, B., Dione, J., Savadogo, K., and Boughton, D. 1997.** Promoting Sustainable Intensification and Productivity Growth in Sahel Agriculture after Macroeconomic Policy Reform. *Food Policy*, 22:317–327.
- Rebafka, F. P., Hebel, A., Bationo, A., Stahr, K., and Marschner, H. 1994.** Short-Term and Long-Term Effects of Crop Residues and of Phosphorus Fertilization on Pearl-Millet Yield on an Acid Sandy Soil in Niger, West-Africa. *Field Crops Research*, 36:113–124.
- Reijntjes, C., Haverkort, B. et Waters-Bayers, A., 1995.** Une agriculture pour demain: Introduction à une agriculture avec peu d'intrants externes, CTA Karthala, 380 pages.
- Ritchie, J.T. 1998.** Soil water balance and plant water stress, In *Understanding Options for Root-Growth and Phosphorus Acquisition of Pearl-Millet in an Acid Sandy Soil in Niger*. *Plant and Soil*, 150:117–127.
- Saïdou, A. ; Kossou, D. ; Acakpo, C. ; Richards, P. ; Kuyper, W.T., 2012.** Effects of farmers' practices of fertilizer application and land use types on subsequent maize yield and nutrient uptake in Central Benin. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 6 (1) : 363-376.
- Saïdou, A. ; Janssen, B.H. ; Jemminghoff, E.J.M., 2003.** Effects of soils properties, mulch and NPK fertilizer on maize yields and nutrient budgets on ferralitic soil in southern Benin. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 100, 265-273.
- Samba, A., B. Sarr, C. Baron, E. Gozé, F. Maraux, B. Clerget et M. Dingkuhn. 2001.** La prévision agricole à l'échelle du Sahel, In *Modélisation Des Agrosystèmes et Aide À La Décision*. Malezieux E., Trebreil G., Jaeger M. (eds.), CIRAD-INRA. p. 243–261.
- Sarr, A., 1975.** Modèle d'étude d'une structure de population : Analyse de la variabilité des populations « naturelles » de maïs (*Zea mays L.*) du Sénégal. Thèse de doctorat-ingénieur. Université de paris-sud, 155 pages.
- Schlecht, E. and Buerkert, A., 2004.** Organic Inputs and Farmers' Management Strategies in Millet Fields of Western Niger. *Geoderma*, 121:271–289.
- Schlecht, E., Hiernaux, P., Achard, F., and Turner, M. D., 2004.** Livestock Related Nutrient Budgets Within Village Territories in Western Niger. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 68:199–211.
- Seidou, O. ; Alhassane, A. et Sarr, B., 2012.** Le Niger peut-il stabiliser sa production de mil en dépit de la variabilité climatique. 4 pages.

- Sinclair, T.R. et N.G. Seligman. 1996.** Crop Modeling: From Infancy to Maturity. *Agronomy Journal* 88: 698–704.
- Singh U. and 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.
- Sissoko, K. et Coulibaly, A. 1998.** La modélisation : outil de formation et d'analyse des stratégies de développement rural, édité Jamana. GUIDE PSS N04, 102 pages.
- Sivakumar, M.V.K., 1991.** Durée et fréquence des périodes sèches en Afrique de l'Ouest : Bulletin de recherche n°13 ICRISAT Patancheru, Andhra Pradesh 502324, Inde.
- Sivakumar, M. V. K., Maidoukia, A., and Stern, R. D., 1993.** Agroclimatology of West Africa: Niger. Information Bulletin no 5. Patancheru, A.P. 502 324, India: International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics, and Niamey: Direction de la météorologie nationale du Niger. 116p.
- Sivakumar et Abdoussalam, 1994.** Observation agro météorologiques : Le travail du sol pour une agriculture durable Fao Chapitre 3.
- Sivakumar, M. V. K. and Salaam, S. A. 1999.** Effect of Year and Fertilizer on Water-Use Efficiency of Pearl Millet (*Pennisetum Glaucum*) in Niger. *Journal of Agricultural Science*, 132:139–148.
- Smith, B., L. Ludlow and Brklacich, M., 1998.** Implications of a global warming for agriculture: a review and appraisal. *Journal of Environmental Quality*. Volume 17 Number 4.
- Smithson, P.C. et Giller, K.E., 2002.** Appropriate farm management practices for alleviating N and P deficiencies in low-nutrient soils of the tropics. *Plant and Soil* 245: 169–180.
- Soil Conservations Service, 1972.** National Engineering Handbook. In Hydrology Section 4. USDA, Washington, USA. 762 pages.
- Struif-Bontkes, T.E., 2001.** Manuel pour le cours d'introduction à la simulation. COSTBOX, IFDC Africa. Lomé. 56 pages.
- Struif-Bontkes, T E., Wopereis, M. C. S., Ankou, K. et Lamboni, D. 2003.** The use of QUEFTS in search of balanced fertilizer recommendation for maize in Togo. In: WOPEREIS, M. C. S. and STRUIT-BONTKES, T E. eds, Decision Support Tools for Smallholder Agriculture in sub-Saharan Africa: a practical guide, 2003. IFDC/CTA, Muscle Shoals/wageningen, Alabama/The Netherlands, pp 68-84.
- 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.
- Tabo, R., Bationo, A., Gérard, B., Ndjeunga, J., Marchal, D., Amadou, B., Annou, G., Sogodogo, D., Sibiry, J. B., Hassane, O., Diallo, M., and Koala, S. 2007.** Improving cereal productivity and farmers' income using a strategic application of fertilizers in West Africa. In: Bationo, A., editor, *Advances in Integrated Soil Fertility Management in Sub-Saharan Africa: Challenges and Opportunities*, pages 201–208. Springer Netherlands.
- Thibault E., 2001.** Impact de différentes densités de semis en fonction des propriétés du sol dans la culture du maïs-grain. Colloque maïs-soya *mieux savoir pour mieux agir*. www.agrireseau.qc.ca/grandescultures/Documents/Eric_Thibault.pdf

- Thornton, P. K., Bowen, W. T., Ravelo, A. C., Wilkens, P. W., Farmer, G., Brock, J., and Brink, J. E. 1997.** Estimating millet production for famine early warning: an application of crop simulation modelling using satellite and ground-based data in Burkina Faso. *Agricultural and Forest Meteorology*, 83:95–112.
- Uryasev, F.S. Royce, R. Ogoshi, A.J. Gijnsman, G.Y. Tsuji, 2010.** Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT) Version 4.5 [CD-ROM]. University of Hawaii, Honolulu, Hawaii.
- Voortman, R. L., Brouwer, J., and Albersen, P. J., 2004.** Characterization of Spatial Soil Variability and Its Effect on Millet Yield on Sudano-Sahelian Coversands in Sw Niger. *Geoderma*, 121:65–82.
- Wallach, D. and Goffinet, B., 1987.** Meansquarederror of prediction in models for studyingecological and agronomie systems. *Biometrics* 43: 561-573.
- Wang, X. B., Cai, D. X., Hoogmoed, W. B., Perdok, U. D., and Oenema, O. 2007.** Crop Residue, Manure and Fertilizer in Dryland Maize Under Reduced Tillage in Northern China: I Grain Yields and Nutrient Use Efficiencies. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 79:1–16.
- West, L. T., Wilding, L. P., Landeck, J. K., Calhoun, F. G. 1984.** Soil survey of the ICRISAT Sahelian center Niger, West Africa. Texas A & M University System College Station, Texas. pp2-5, 12-20, 34-36.
- Williams, J., C. Jones et P. Dyke. 1984.** A modeling approach to determining the relationship between erosion and soil productivity. *Transactions of the ASABE* 27: 0129–0144.
- Wilmott, 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 (C5): 8995-9005.
- Zaongo, C. G. L., Wendt, C. W., Lascano, R. J., and Juo, A. S. R. 1997.** Interactions of Water, Mulch and Nitrogen on Sorghum in Niger. *Plant and Soil*, 197:119–126.

Annexes

Annexe I : Caractéristiques chimiques du sol du site avant l'implantation de l'essai (1997)

Profondeur (cm)	pH-Eau	N-tot (mg/kg)	C-org (%)	P-Bray I (mg/kg)	Al éch (Cmol ⁺ /kg)
0-20	5,4	163	0,18	2,1	0,11
20-40	5,3	132	0,14	1,5	0,25

N.B : C-org : Carbone organique ; N-tot : Azote total ; C-org : Carbone organique ; P-Bray I : Phosphore assimilable ; Al éch : Aluminium échangeable

Source : Laboratoire des sols du C.S.I

Annexe II : Caractéristiques physico-chimiques du sol du site en 2005

Prof. (cm)	Sable (%)	Limons (%)	Argile (%)	pH-KCl	N-total (mg/kg)	P-Bray I (mg/kg)	C-Org (%)	H ⁺ (méq/100g)	Al ³⁺ (méq/100g)	Na ⁺ (Cmol ⁺ /kg)	K ⁺ (Cmol ⁺ /kg)	Ca ²⁺ (Cmol ⁺ /kg)	Mg ²⁺ (Cmol ⁺ /kg)
0-10	93,31	2,42	4,28	4,17	147,97	7,57	0,19	0,11	0,23	0,04	0,07	0,18	0,09
10-20	91,42	2,46	6,12	3,60	117,49	3,84	0,14	0,12	0,43	0,03	0,06	0,14	0,05
20-40	89,16	2,10	8,74	3,48	102,12	2,38	0,11	0,15	0,49	0,05	0,06	0,12	0,05
40-60	87,82	2,24	9,94	3,52	94,96	1,99	0,09	0,15	0,48	0,04	0,05	0,12	0,06

N.B : C-org : Carbone organique ; N-tot : Azote total ; C-org : Carbone organique ; P-Bray I : Phosphore assimilable ; Al éch : Aluminium échangeable

Source : Laboratoire des sols du C.S.I

Annexe III : Variations de la pluviométrie mensuelle (mm) du C.S.I de 1998-2013

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Total
1998	0,0	0,0	0,0	1,3	46,1	56,6	132,0	254,8	275,2	0,6	0,0	0,0	766,6
1999	0,0	0,0	0,0	2,1	2,4	75,5	109,9	205,4	158,0	19,0	0,0	0,0	572,3
2000	0,0	0,0	0,0	3,0	0,3	62,2	215,5	107,9	55,9	3,5	0,0	0,0	448,3
2001	0,0	0,0	0,0	6,1	191,1	89,8	121,1	51,1	26,7	0,0	0,0	0,0	485,9
2002	0,0	0,0	0,0	0,0	17,1	83,2	105,5	165,8	112,2	70,5	0,0	0,0	554,3
2003	0,0	0,0	28,0	0,0	42,7	96,7	61,1	171,9	119,4	14,4	0,0	0,0	534,2
2004	0,0	0,0	0,0	15,3	50,2	86,1	132,3	159,3	109,9	9,0	0,0	0,0	562,1
2005	0,0	0,0	0,0	0,0	24,4	113,8	132,7	109,9	44,2	63,5	0,0	0,0	488,5
2006	0,0	0,0	0,0	0,0	3,4	36,6	175,7	181,8	176,4	2,1	0,0	0,0	576,0
2007	0,0	0,0	0,0	7,8	28,5	30,8	140,2	232,6	61,8	0,0	0,0	0,0	501,7
2008	0,0	0,0	0,0	0,0	22,3	71,9	158,7	164,4	45,1	18,2	0,0	0,0	480,6
2009	0,0	0,0	0,0	2,7	19,3	60,4	142,0	202,2	67,2	21,8	0,0	0,0	515,6
2010	0,0	0,0	0,0	1,2	24,9	83,7	149,2	187,3	143,0	98,2	0,0	0,0	687,5
2011	0,0	0,4	0,0	0,4	1,4	97,8	57,0	250,0	58,4	32,4	0,0	0,0	497,8
2012	0,0	0,3	0,0	0,7	8,1	30,5	177,2	282,4	133,7	16,2	0,0	0,0	649,1
2013	0,0	0,0	0,0	22,9	7,5	44,4	99,0	400,5	17,6	2,5	0,0	0,0	594,4
Moy.	0,0	0,0	1,8	4,0	30,6	70,0	131,8	195,5	100,3	23,2	0,0	0,0	557,2

Annexe IV : Variations des températures minimales mensuelles (°C) du C.S.I de 1998-2013

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Moy
1998	16,4	19,9	20,9	27,3	28,7	26,1	24,6	23,2	23,3	24,3	19,5	17,2	22,6
1999	17,2	19,3	23,5	25,9	27,8	26,9	23,8	23,1	22,9	21,7	19,0	16,0	22,2
2000	19,0	16,0	21,0	25,7	24,8	25,3	23,7	23,1	24,2	23,1	18,3	16,3	21,7
2001	14,8	17,2	20,8	26,8	28,0	23,1	25,0	23,3	23,3	22,3	17,9	17,4	21,7
2002	15,9	16,7	22,8	27,1	28,5	25,3	23,9	23,0	23,1	21,7	17,5	15,5	21,8
2003	16,4	19,1	21,4	26,6	26,1	24,2	22,6	23,3	23,1	23,8	19,3	15,7	21,8
2004	16,8	18,9	25,2	26,4	27,5	25,0	23,7	23,2	23,4	21,5	20,4	17,1	22,4
2005	15,9	23,4	25,2	25,8	27,5	25,0	23,8	22,1	23,5	21,5	18,5	17,1	22,5
2006	18,0	20,1	22,7	24,3	27,1	26,7	22,5	22,9	22,5	23,1	17,6	16,0	21,9
2007	15,5	18,4	21,8	27,9	26,6	25,9	22,4	21,9	23,0	22,3	18,9	17,9	21,9
2008	13,3	16,8	22,0	24,7	26,4	25,8	23,1	23,2	23,5	22,4	18,6	17,5	21,4
2009	16,9	21,2	24,1	26,6	27,9	25,9	24,3	23,6	23,8	24,8	19,9	17,6	23,0
2010	16,5	20,6	24,5	28,2	28,6	26,1	24,5	23,5	23,3	23,8	20,3	16,4	23,0
2011	16,1	21,6	24,0	26,2	28,6	26,6	24,9	23,3	23,7	23,8	18,3	16,0	22,8
2012	15,9	21,0	22,6	27,7	27,6	26,3	24,0	23,0	23,3	23,8	20,6	17,1	22,7
2013	16,8	19,2	24,4	26,8	28,1	26,0	24,5	22,5	23,6	21,9	18,5	17,5	22,5
Moy	16,3	19,3	22,9	26,5	27,5	25,6	23,8	23,0	23,3	22,9	18,9	16,8	22,2

Annexe V : Variations des températures maximales mensuelles (°C) du C.S.I de 1998-2013

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Moy
1998	33,1	37,2	37,3	42,7	41,1	36,7	34,7	31,6	33,1	37,4	36,4	34,6	36,3
1999	33,3	34,9	41,5	42,0	41,5	39,8	33,5	31,5	33,1	36,4	37,3	33,5	36,5
2000	35,2	32,9	38,5	43,1	42,0	38,4	33,5	32,2	36,1	37,7	37,8	33,3	36,7
2001	33,1	34,3	40,5	42,3	41,2	34,0	36,4	31,9	34,8	38,0	36,2	35,6	36,5
2002	31,3	35,0	40,3	42,5	42,5	37,0	34,6	32,4	34,6	35,7	37,2	33,6	36,4
2003	34,2	38,5	38,9	41,9	41,4	37,7	35,5	32,3	34,1	39,3	38,3	34,0	37,2
2004	33,9	36,0	41,5	41,7	41,4	36,6	32,1	33,2	35,6	37,5	38,0	35,2	36,9
2005	31,9	38,7	41,5	43,0	41,4	36,6	33,3	32,8	35,3	37,5	37,9	35,2	37,1
2006	36,1	38,1	40,8	42,3	41,2	39,5	35,6	31,7	33,3	37,6	35,9	33,4	37,1
2007	31,2	36,9	39,3	42,1	40,7	38,8	34,5	32,0	34,4	39,9	38,2	34,0	36,8
2008	29,5	33,8	40,6	41,1	40,8	38,6	33,6	32,8	35,0	38,3	37,5	35,4	36,4
2009	33,9	39,0	40,9	42,6	41,5	37,3	34,7	31,7	34,0	37,4	36,0	35,1	37,0
2010	34,6	39,0	39,8	42,2	40,8	37,4	33,7	31,9	33,4	36,0	37,7	33,7	36,7
2011	32,3	36,7	41,1	41,2	41,1	37,5	35,0	32,4	34,2	37,3	37,0	32,1	36,5
2012	31,9	36,5	38,1	41,5	39,9	37,4	33,4	31,4	33,4	36,9	38,3	34,3	36,1
2013	32,6	36,2	42,0	40,1	40,6	38,2	34,1	30,7	34,1	37,9	37,8	32,8	36,4
Moy	33,0	36,5	40,2	42,0	41,2	37,6	34,3	32,0	34,3	37,6	37,3	34,1	36,7

Annexe VI : Variations de la radiation solaire mensuelle (MJ/m²/j) du C.S.I de 1998-2013

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Moy
1998	21,7	24,3	26,0	23,0	23,0	22,5	21,7	18,6	20,6	22,7	22,0	20,3	22,2
1999	21,9	23,2	25,9	24,9	24,9	24,5	21,5	19,6	22,5	23,1	22,8	22,5	23,1
2000	21,3	25,7	27,3	26,6	25,3	24,4	21,1	20,9	24,3	22,0	24,0	22,5	23,8
2001	22,0	23,6	26,5	25,5	24,0	24,2	21,4	20,8	22,6	23,2	22,4	20,9	23,1
2002	21,0	25,0	25,1	25,5	24,9	24,1	21,5	22,5	22,9	21,6	21,7	21,4	23,1
2003	21,4	23,8	24,9	25,2	26,7	22,5	23,3	20,5	22,6	23,2	22,2	21,9	23,2
2004	21,9	24,0	24,0	24,9	24,9	24,1	22,2	22,5	24,2	24,5	22,9	22,7	23,6
2005	21,5	22,5	24,5	26,9	25,9	24,3	23,3	23,7	23,0	24,1	23,1	22,6	23,8
2006	21,4	25,1	27,0	28,5	25,1	24,9	21,6	21,3	22,1	20,6	24,7	23,4	23,8
2007	22,9	27,4	28,2	24,2	24,3	25,3	23,9	22,3	23,7	25,0	23,2	22,1	24,4
2008	24,7	26,7	29,5	28,2	26,1	25,5	24,0	22,1	23,2	23,3	22,0	20,6	24,7
2009	21,6	23,1	25,8	26,3	25,9	23,5	23,9	22,4	22,4	22,3	21,6	20,6	23,3
2010	22,0	24,1	25,9	25,6	24,4	23,9	22,4	19,6	21,9	20,8	20,5	20,5	22,6
2011	20,9	20,7	24,1	23,1	23,0	21,7	22,0	20,4	22,7	22,0	22,8	20,8	22,0
2012	21,0	21,4	25,2	22,7	23,2	22,2	21,0	20,5	22,7	22,3	21,6	20,8	22,0
2013	20,8	23,4	25,3	24,0	23,7	22,6	20,7	17,7	21,4	22,0	21,4	19,0	21,8
Moy	21,8	24,0	26,0	25,3	24,7	23,8	22,2	21,0	22,7	22,7	22,4	21,4	23,2

Annexe VII : Nombre de jours de pluie de mai à octobre par année du C.S.I de 1998-2013

	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Total
1998	3	7	9	13	9	1	42
1999	3	3	12	12	11	3	44
2000	1	6	10	7	3	1	28
2001	4	8	9	9	6	3	39
2002	2	4	6	9	8	4	33
2003	3	7	5	11	7	2	35
2004	2	5	8	9	6	1	31
2005	5	7	10	9	6	3	40
2006	2	5	10	12	10	1	40
2007	3	5	6	9	6	0	29
2008	3	4	8	13	5	2	35
2009	4	8	11	10	7	4	44
2010	3	5	5	13	10	5	41
2011	2	7	8	13	6	2	38
2012	2	4	9	10	7	2	34
2013	3	5	19	15	6	2	50

Annexe VIII : Rendements grain (kg/ha) observés et simulés en fonction des traitements (système mil continu, 1998-2013)

Traitements	1998		1999		2000		2001		2002		2003		2004		2005	
	Obs.	Sim.	Obs.	Sim.	Obs.	Sim.	Obs.	Sim.	Obs.	Sim.	Obs.	Sim.	Obs.	Sim.	Obs.	Sim.
R0F0M0	276	240	577	153	344	103	236	232	190,3	152	334	231	162	126	133	113
R0F0M1	585	310	814	240	470	191	791	278	362	232	465	291	304	206	500	215
R0F0M2	850	486	891	441	497	266	800	255	620,7	423	775	473	540	386	609	286
R0F1M0	941	598	1331	561	641	290	873	271	456	535	564	603	362	486	682	197
R0F1M1	787	666	1393	626	625	303	810	278	762,3	592	860	666	502	545	676	203
R0F1M2	1204	849	1462	812	955	353	1089	309	1089,7	736	1100	762	768	715	882	219
R0F2M0	1228	1223	1192	1207	877	476	917	289	840,7	1116	834	890	631	993	1097	205
R0F2M1	1342	1278	1348	1272	908	489	1032	284	978,3	1172	1181	909	731	1028	1070	203
R0F2M2	1106	1444	1366	1425	892	518	1292	286	1120	1333	1443	984	830	1148	1012	211
R1F0M0	508	265	728	240	341	136	493	247	160	171	516	249	208	148	467	135
R1F0M1	531	326	586	264	344	214	658	281	517,7	239	522	307	390	221	423	232
R1F0M2	797	505	990	460	712	271	802	258	834	443	925	492	552	405	652	283
R1F1M0	588	617	876	577	493	294	650	276	644,7	554	726	619	247	500	716	200
R1F1M1	996	686	1249	642	761	308	1090	280	940	606	906	681	641	558	878	206
R1F1M2	1262	861	1194	826	900	359	1033	309	1046,3	745	1057	774	874	727	1115	212
R1F2M0	709	1238	1312	1226	933	482	1351	300	847	1130	984	895	493	1013	982	201
R1F2M1	1511	1298	1269	1290	974	493	1404	299	957,7	1188	1253	915	875	1044	1093	201
R1F2M2	981	1468	1811	1446	780	522	1450	294	1040,3	1355	1442	989	1186	1160	1033	210
R2F0M0	480	319	757	249	483	212	634	306	360	194	478	266	93	224	691	187
R2F0M1	570	376	889	312	520	269	948	269	491,7	262	667	332	324	292	618	257
R2F0M2	372	557	910	510	608	288	725	272	880	446	960	530	540	447	862	221
R2F1M0	1054	669	1225	619	764	311	1004	281	841,7	560	894	647	570	550	876	197
R2F1M1	1361	733	1069	684	855	328	1001	279	1022,7	612	969	709	701	609	1022	206
R2F1M2	1298	913	1256	869	868	377	1486	309	1279,7	771	1123	780	941	766	1146	202
R2F2M0	1569	1294	1620	1266	788	494	1303	354	1052,3	1166	1139	894	646	1057	1133	185

R2F2M1	1641	1348	1605	1333	1189	503	1486	345	1278	1222	1393	915	896	1093	1030	188
R2F2M2	1280	1516	1271	1486	914	536	1515	325	1385,7	1398	1487	995	1199	1188	1349	196
Moyenne	956	818	1147	779	720	348	995	288	815	717	926	659	600	653	842	206
Différence moyenne	-138		-368		-372		-707		-98		-266		53		-636	
Ratio	0,86		0,64		0,48		0,33		0,86		0,71		1,13		0,29	
RMSE	310,01		444,48		394,83		771,42		261,04		302,08		201,39		691,69	
NRMSE	32%		39%		55%		78%		32%		33%		34%		82%	
R²	0,58		0,68		0,73		0,56		0,64		0,81		0,68		0,01	
d-Stat.	0,84		0,72		0,55		0,40		0,87		0,77		0,89		0,38	

	2006		2007		2008		2009		2010		2011		2012		2013	
Traitements	Obs.	Sim.	Obs.	Sim.	Obs.	Sim.	Obs.	Sim.	Obs.	Sim.	Obs.	Sim.	Obs.	Sim.	Obs.	Sim.
R0F0M0	109	111	133	210	370	160	357	101	226	132	179	124	307	44	204	108
R0F0M1	256	190	489	270	305	238	797	174	414	236	616	211	444	106	644	176
R0F0M2	405	389	363,7	434	523	430	670	392	503	457	530	429	676	327	518	106
R0F1M0	480	512	327,3	430	684	508	797	434	615	578	548	504	666	387	519	100
R0F1M1	452	579	440	472	559	562	954	393	596	644	621	559	717	390	410	91
R0F1M2	540	756	468,3	612	929	716	1058	266	902	821	675	654	901	346	725	62
R0F2M0	670	1179	482	734	625	883	1037	234	744	1249	702	769	737	306	440	42
R0F2M1	518	1243	479,7	768	710	920	1171	242	810	1308	615	814	648	309	343	39
R0F2M2	724	1437	693,3	886	796	1030	1169	268	758	1497	814	882	1088	321	857	34
R1F0M0	298	121	237	227	334	186	550	121	406	151	458	140	368	57	291	132
R1F0M1	356	218	182,3	299	414	260	478	201	399	260	275	237	513	131	349	196
R1F0M2	581	410	361,3	457	610	447	628	410	432	477	479	448	602	347	530	106
R1F1M0	278	529	223	450	702	523	832	443	543	587	413	521	431	397	348	101
R1F1M1	446	596	511,3	492	739	576	928	405	651	651	537	576	834	401	560	88
R1F1M2	499	772	517	634	824	729	1005	264	718	835	777	669	921	352	714	62
R1F2M0	730	1195	567,7	752	862	896	1002	234	693	1266	586	787	694	306	486	40

R1F2M1	748	1260	670,3	787	865	934	959	242	873	1325	574	823	837	309	650	39
R1F2M2	719	1458	537	905	913	1037	1016	273	874	1515	971	897	937	323	746	33
R2F0M0	486	206	248,3	325	567	256	875	209	553	207	495	178	550	135	517	194
R2F0M1	481	276	330,3	373	648	319	763	278	467	281	551	249	539	203	567	175
R2F0M2	460	476	284,3	528	818	488	887	443	541	492	545	453	511	392	737	95
R2F1M0	594	587	555	506	944	566	1080	413	714	614	626	553	939	387	651	93
R2F1M1	425	641	540,3	552	1038	617	1109	356	637	676	801	612	926	373	864	85
R2F1M2	570	830	526	701	908	763	1170	260	761	865	1071	689	961	353	1028	61
R2F2M0	834	1248	531,3	805	918	931	1157	244	875	1283	909	814	909	312	825	41
R2F2M1	640	1315	682	844	1041	965	1343	256	850	1343	1143	848	747	314	616	37
R2F2M2	925	1522	599	969	832	998	1327	304	743	1548	793	869	548	328	772	32
Moyenne	527	743	444	571	721	627	930	291	641	789	641	567	702	295	589	88
Différence moyenne	295		127		-94		-639		148		-74		-407		-502	
Ratio	1,32		1,32		0,85		0,33		1,14		0,88		0,42		0,18	
RMSE	377,42		181,01		206,30		684,01		354,04		188,23		438,25		547,14	
NRMSE	72%		41%		29%		74%		55%		29%		62%		93%	
R²	0,73		0,66		0,56		0,03		0,73		0,52		0,38		0,15	
d-Stat.	0,67		0,77		0,82		0,36		0,69		0,82		0,48		0,34	

Source : DSSAT

Annexe IX : Rendements grain (kg/ha) observés et simulés en fonction des traitements (système mil en rotation avec le niébé, 1998-2013)

Traitements	1998		1999		2000		2001		2002		2003		2004		2005	
	Obs.	Sim.	Obs.	Sim.	Obs.	Sim.	Obs.	Sim.	Obs.	Sim.	Obs.	Sim.	Obs.	Sim.	Obs.	Sim.
R0F0M0	522	240	590	153	491	103	399	232	193	152	445	231	347	126	487	113
R0F0M1	810	310	861	240	603	191	947	278	289,7	232	588	291	524	206	841	215
R0F0M2	1029	486	856	441	651	266	1329	255	900,3	423	964	473	913	386	847	286
R0F1M0	1121	598	1342	561	883	290	1087	271	560,3	535	741	603	636	486	722	197
R0F1M1	1391	666	1270	626	972	303	1305	278	814	592	834	666	896	545	803	203
R0F1M2	1411	849	1355	812	1232	353	1407	309	1100,3	736	1129	762	1243	715	1220	219
R0F2M0	1612	1223	1365	1207	1199	476	1243	289	881	1116	1087	890	1008	993	1364	205
R0F2M1	1576	1278	1726	1272	1074	489	1400	284	1125,3	1172	1492	909	1332	1028	1313	203
R0F2M2	2060	1444	1962	1425	1363	518	1539	286	1278,7	1333	1730	984	1504	1148	1316	211
R1F0M0	1015	265	705	240	572	136	751	247	391	171	594	249	575	148	538	135
R1F0M1	766	326	899	264	719	214	716	281	584,7	239	648	307	633	221	696	232
R1F0M2	859	505	1007	460	1064	271	1270	258	1029,7	443	1073	492	1264	405	1163	283
R1F1M0	938	617	1485	577	905	294	1129	276	727,3	554	895	619	849	500	841	200
R1F1M1	1776	686	1356	642	983	308	1245	280	1040,7	606	1033	681	1133	558	945	206
R1F1M2	1541	861	1537	826	1364	359	1503	309	1287	745	1393	774	1461	727	1175	212
R1F2M0	1952	1238	1968	1226	1110	482	1537	300	1036,3	1130	1227	895	928	1013	1478	201
R1F2M1	1994	1298	1726	1290	1208	493	1701	299	1099,7	1188	1441	915	1419	1044	1488	201
R1F2M2	1902	1468	1488	1446	1408	522	1522	294	1673,3	1355	1585	989	1671	1160	1692	210
R2F0M0	631	319	868	249	589	212	953	306	441,7	194	696	266	338	224	964	187
R2F0M1	818	376	805	312	571	269	1306	269	525,7	262	890	332	544	292	700	257
R2F0M2	788	557	1355	510	1281	288	1277	272	919,7	446	1102	530	812	447	949	221
R2F1M0	1319	669	1298	619	1094	311	1479	281	1014	560	985	647	870	550	1179	197
R2F1M1	1358	733	1117	684	1261	328	1442	279	1207,3	612	1149	709	1185	609	1176	206
R2F1M2	1494	913	1473	869	1314	377	1806	309	1424,7	771	1294	780	1298	766	1429	202
R2F2M0	2027	1294	1954	1266	1490	494	1724	354	1118	1166	1514	894	991	1057	1582	185

R2F2M1	1924	1348	1609	1333	1303	503	1552	345	1421,3	1222	1421	915	1273	1093	1403	188
R2F2M2	2071	1516	1814	1486	1431	536	1828	325	1746,3	1398	1514	995	1473	1188	1487	196
Moyenne	1359	818	1325	779	1042	348	1311	288	956	717	1091	659	1004	653	1104	206
Différence moyenne	-541		-546		-694		-1023		-240		-432		-351		-897	
Ratio	0,58		0,55		0,33		0,24		0,73		0,59		0,63		0,20	
RMSE	572,34		580,34		725,86		1070,40		340,04		459,06		412,87		955,09	
NRMSE	42%		44%		70%		82%		36%		42%		41%		87%	
R²	0,86		0,79		0,69		0,47		0,67		0,82		0,66		0,01	
d-Stat.	0,72		0,67		0,45		0,32		0,83		0,66		0,74		0,37	

	2006		2007		2008		2009		2010		2011		2012		2013	
Traitements	Obs.	Sim.	Obs.	Sim.	Obs.	Sim.	Obs.	Sim.	Obs.	Sim.	Obs.	Sim.	Obs.	Sim.	Obs.	Sim.
R0F0M0	215	111	131,7	210	470	160	457	101	462	132	136	124	548	44	175	108
R0F0M1	228	190	400,3	270	714	238	703	174	711	236	387	211	637	106	394	176
R0F0M2	591	389	400	434	756	430	826	392	694	457	501	429	736	327	482	106
R0F1M0	427	512	419	430	1046	508	998	434	604	578	568	504	664	387	499	100
R0F1M1	454	579	437	472	946	562	883	393	796	644	553	559	637	390	407	91
R0F1M2	748	756	569	612	1020	716	945	266	928	821	688	654	960	346	859	62
R0F2M0	651	1179	521,7	734	828	883	850	234	871	1249	796	769	703	306	472	42
R0F2M1	528	1243	567	768	889	920	1159	242	760	1308	718	814	676	309	419	39
R0F2M2	686	1437	836	886	1080	1030	1438	268	1023	1497	955	882	952	321	846	34
R1F0M0	352	121	240	227	484	186	521	121	448	151	401	140	351	57	475	132
R1F0M1	464	218	316,7	299	628	260	788	201	563	260	421	237	734	131	334	196
R1F0M2	631	410	503,3	457	1081	447	767	410	846	477	522	448	1018	347	761	106
R1F1M0	416	529	334	450	921	523	1019	443	787	587	736	521	782	397	411	101
R1F1M1	662	596	440	492	1140	576	968	405	1035	651	709	576	643	401	590	88
R1F1M2	611	772	665,7	634	1217	729	1269	264	1071	835	777	669	1059	352	898	62
R1F2M0	829	1195	654,3	752	1087	896	1199	234	934	1266	874	787	804	306	508	40

R1F2M1	977	1260	607,3	787	1308	934	1309	242	1110	1325	845	823	856	309	652	39
R1F2M2	826	1458	570	905	1168	1037	1420	273	790	1515	885	897	862	323	785	33
R2F0M0	423	206	351	325	850	256	945	209	518	207	503	178	628	135	523	194
R2F0M1	563	276	325,3	373	838	319	832	278	660	281	669	249	619	203	494	175
R2F0M2	796	476	537	528	1002	488	1077	443	1058	492	756	453	1075	392	833	95
R2F1M0	652	587	639	506	1090	566	1179	413	808	614	685	553	751	387	846	93
R2F1M1	354	641	583	552	1304	617	1536	356	1118	676	819	612	997	373	833	85
R2F1M2	617	830	831	701	1392	763	1482	260	1245	865	1127	689	904	353	1237	61
R2F2M0	900	1248	708,3	805	1079	931	1050	244	1013	1283	986	814	908	312	908	41
R2F2M1	670	1315	691,3	844	1231	965	1515	256	1077	1343	894	848	831	314	782	37
R2F2M2	877	1522	763,3	969	1161	998	1252	304	1215	1548	1178	869	434	328	1114	32
Moyenne	598	743	520	571	990	627	1051	291	857	789	707	567	769	295	650	88
Différence moyenne	145		51		-362		-760		-68		-140		-474		-562	
Ratio	1,18		1,11		0,62		0,29		0,88		0,79		0,38		0,18	
RMSE	363,42		122,15		414,59		810,28		361,56		192,41		497,92		626,24	
NRMSE	61%		23%		42%		77%		42%		27%		65%		96%	
R²	0,54		0,74		0,49		0,05		0,42		0,72		0,30		0,26	
d-Stat.	0,67		0,90		0,60		0,37		0,70		0,84		0,40		0,37	

Source : DSSAT

Annexe X : Rendements grain (kg/ha) observés et simulés en fonction des traitements (système mil en association avec le niébé. 1998-2013)

Traitements	1998		1999		2000		2001		2002		2003		2004		2005	
	Obs.	Sim.	Obs.	Sim.	Obs.	Sim.	Obs.	Sim.	Obs.	Sim.	Obs.	Sim.	Obs.	Sim.	Obs.	Sim.
R0F0M0	182	224	285	140	294	93	406	200	201,7	149	221	203	225	121	159	112
R0F0M1	330	282	346	215	211	168	540	259	338	207	373	253	368	194	298	201
R0F0M2	314	457	547	410	336	239	861	243	496,7	402	734	439	540	355	457	268
R0F1M0	523	566	501	520	482	257	709	250	322,3	489	490	549	320	458	527	172
R0F1M1	454	629	491	574	439	272	692	248	537,7	536	683	608	527	507	494	173
R0F1M2	781	791	709	752	501	321	819	284	902,3	672	882	642	669	649	751	178
R0F2M0	806	1164	761	1131	742	440	1036	248	628,7	1079	1082	812	422	901	788	180
R0F2M1	543	1218	908	1179	645	452	971	249	820,7	1131	1255	835	566	945	957	184
R0F2M2	957	1384	726	1345	771	481	1220	262	917,3	1300	1258	931	896	1046	713	196
R1F0M0	231	244	302	215	228	123	351	216	179,7	169	533	223	212	141	301	133
R1F0M1	176	298	382	233	308	190	713	269	360,7	218	615	275	405	214	354	221
R1F0M2	345	476	518	430	368	243	960	246	471,7	417	679	461	727	378	543	268
R1F1M0	612	584	469	535	344	262	512	247	436,7	503	487	570	444	470	555	175
R1F1M1	627	649	663	590	586	278	1115	248	640	543	801	621	639	521	664	178
R1F1M2	337	803	769	769	482	327	1225	287	787	682	912	656	888	663	950	176
R1F2M0	678	1179	584	1152	794	444	1075	253	648	1093	856	820	423	918	710	179
R1F2M1	958	1234	814	1198	1037	455	1119	255	756	1144	1051	843	584	956	992	183
R1F2M2	591	1400	785	1364	664	486	1225	269	871,3	1319	1495	938	934	1057	949	195
R2F0M0	110	290	369	230	281	187	459	277	260	179	521	230	243	198	408	170
R2F0M1	364	346	448	292	276	251	736	250	402,7	241	632	295	317	268	506	236
R2F0M2	225	527	531	489	281	258	907	251	573,3	416	798	489	343	427	728	193
R2F1M0	328	633	560	581	655	278	1013	245	600,3	510	770	589	523	508	775	170
R2F1M1	437	692	669	637	591	298	1051	255	795,7	560	994	614	696	564	883	177
R2F1M2	722	847	614	820	656	347	1338	300	1019,7	718	1132	660	822	710	797	173
R2F2M0	415	1223	841	1192	679	455	1263	277	908,7	1118	1218	819	480	955	830	166

R2F2M1	901	1277	807	1244	724	465	1235	279	1022	1184	1281	844	635	995	803	170
R2F2M2	852	1450	728	1420	930	498	1315	286	1139,7	1366	1286	946	932	1084	1050	183
Moyenne	511	773	597	728	530	317	921	258	631	679	853	599	547	600	1104	186
Différence moyenne	262		131		-212		-663		48		-255		53		-918	
Ratio	1,58		1,13		0,62		0,31		1,03		0,71		1,10		0,19	
RMSE	360,28		297,86		248,81		718,89		234,59		298,27		238,60		975,31	
NRMSE	71%		50%		47%		78%		37%		35%		44%		88%	
R²	0,64		0,77		0,78		0,36		0,69		0,78		0,44		0,00	
d-Stat.	0,73		0,74		0,67		0,39		0,86		0,76		0,78		0,36	

	2006		2007		2008		2009		2010		2011		2012		2013	
Traitements	Obs.	Sim.	Obs.	Sim.	Obs.	Sim.	Obs.	Sim.	Obs.	Sim.	Obs.	Sim.	Obs.	Sim.	Obs.	Sim.
R0F0M0	220	83	115,7	207	438	146	545	91	469	122	339	110	310	37	194	100
R0F0M1	68	163	105,7	263	337	214	310	162	404	221	181	196	287	98	105	162
R0F0M2	341	352	246	412	447	397	523	363	451	432	307	404	550	300	295	100
R0F1M0	281	461	212,3	409	644	468	805	394	529	537	424	482	490	359	194	94
R0F1M1	278	517	186,3	450	645	517	612	314	576	594	550	542	401	345	255	85
R0F1M2	413	694	434,7	573	696	665	975	207	667	759	639	628	718	271	307	61
R0F2M0	444	1107	336,3	681	597	839	986	209	675	1205	619	732	511	264	386	37
R0F2M1	213	1176	277,3	713	531	880	811	219	543	1266	646	779	647	268	280	34
R0F2M2	421	1373	461	788	732	971	962	252	588	1427	810	851	547	291	647	30
R1F0M0	85	106	36,7	230	302	169	421	109	362	151	297	138	245	54	255	124
R1F0M1	292	182	280,3	285	487	234	552	188	427	240	306	218	488	122	146	182
R1F0M2	371	373	386,3	434	710	413	807	380	586	449	567	421	415	317	273	99
R1F1M0	131	481	112,7	428	439	485	641	390	402	550	396	498	441	369	215	91
R1F1M1	373	532	278,3	469	660	531	837	318	633	608	588	560	614	353	404	82
R1F1M2	310	711	351,3	589	708	677	1053	208	710	776	651	644	368	287	443	58
R1F2M0	490	1129	377,3	698	634	850	850	211	555	1224	559	770	502	265	298	35

R1F2M1	661	1195	398,3	732	714	895	1037	220	760	1284	527	800	572	269	341	34
R1F2M2	450	1394	367,7	791	820	980	1172	258	740	1451	887	866	348	293	442	29
R2F0M0	227	182	121	309	435	228	521	189	440	183	439	162	327	122	323	178
R2F0M1	227	244	129,3	353	674	293	526	256	484	256	529	228	465	180	239	173
R2F0M2	382	437	263	502	765	455	583	412	667	465	595	433	465	368	360	88
R2F1M0	301	526	331,7	477	913	527	979	322	716	576	661	530	642	355	438	87
R2F1M1	244	584	414,3	517	873	574	1091	264	842	631	787	591	655	320	353	80
R2F1M2	452	777	532,3	640	933	712	1135	203	672	812	840	670	641	289	860	55
R2F2M0	411	1197	525,7	751	764	892	1023	223	679	1237	618	789	414	270	723	36
R2F2M1	316	1263	476	782	847	934	1226	232	772	1311	744	816	468	274	515	33
R2F2M2	330	1473	301,7	836	999	948	1245	281	599	1493	895	848	290	298	570	29
Moyenne	323	693	298	530	657	589	823	255	591	750	570	545	475	261	365	81
Différence moyenne	370		232		-68		-568		160		-26		-214		-284	
Ratio	2,15		2,08		0,88		0,34		1,22		0,94		0,56		0,33	
RMSE	526,10		261,37		217,87		628,85		415,68		148,77		242,14		349,84	
NRMSE	163%		88%		33%		76%		70%		26%		51%		96%	
R²	0,38		0,59		0,41		0,00		0,35		0,63		0,26		0,36	
d-Stat.	0,37		0,57		0,75		0,40		0,46		0,87		0,51		0,35	

Source : DSSAT

Annexe XI : Rendements grain simulés en fonction des traitements de 1983-2013 (systèmes mil continu et mil en rotation avec le niébé)

	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12	T13	T14	T15	T16	T17	T18	T19	T20	T21	T22	T23	T24	T25	T26	T27
1983	648	707	880	920	947	967	1027	1036	1010	657	728	890	933	960	976	1039	1044	992	700	765	912	954	982	965	1059	1054	957
1984	582	615	677	688	699	724	754	757	786	595	628	686	699	704	733	768	762	799	627	661	708	718	728	768	810	817	826
1985	636	692	861	886	940	1097	1290	1342	1505	645	701	872	901	955	1108	1299	1350	1514	670	728	906	932	985	1145	1320	1372	1541
1986	468	527	704	799	857	1022	1359	1411	1567	473	533	713	801	859	1037	1371	1427	1579	514	579	760	843	902	1073	1415	1469	1621
1987	620	670	850	957	1018	1179	1468	1511	1659	629	681	860	972	1033	1195	1475	1523	1662	656	712	895	1010	1069	1204	1513	1540	1668
1988	661	710	877	867	915	1076	1238	1284	1447	668	720	891	877	926	1089	1246	1295	1461	696	752	929	899	953	1124	1268	1321	1496
1989	585	610	685	677	700	758	831	851	898	593	620	696	688	709	765	836	855	901	622	649	725	708	729	782	848	866	895
1990	571	614	760	767	810	943	1108	1143	1261	581	621	772	775	819	953	1116	1151	1267	596	644	797	796	840	973	1132	1164	1262
1991	448	499	677	701	751	907	1082	1131	1256	454	516	681	706	761	922	1093	1142	1266	501	557	734	751	804	968	1138	1181	1311
1992	642	687	823	882	923	1041	1267	1301	1401	656	701	837	897	938	1055	1282	1315	1415	690	735	872	935	977	1093	1321	1355	1451
1993	671	722	866	836	883	1030	1122	1142	1242	682	727	877	841	890	1041	1137	1156	1250	690	744	893	856	906	1060	1147	1182	1261
1994	648	703	870	854	898	1040	1199	1266	1401	662	718	881	863	909	1048	1204	1272	1410	691	750	914	882	934	1080	1228	1298	1437
1995	543	567	613	608	624	670	747	766	823	553	575	621	618	633	681	755	774	825	580	592	653	647	662	704	770	788	829
1996	544	595	761	867	916	1054	1415	1453	1557	558	615	777	884	932	1067	1431	1469	1562	593	650	810	906	954	1086	1452	1491	1596
1997	618	657	793	793	834	960	1131	1167	1252	626	668	806	803	847	970	1139	1174	1265	649	695	837	828	867	991	1156	1193	1291
1998	614	653	781	783	821	941	1043	1073	1163	626	665	794	793	832	954	1055	1085	1179	655	696	828	821	861	984	1084	1115	1217
1999	774	831	1004	1123	1181	1358	1772	1832	2007	779	839	1012	1132	1189	1369	1784	1845	2016	795	861	1052	1173	1233	1409	1824	1881	2053
2000	648	690	839	827	869	1012	1173	1213	1352	653	695	847	830	874	1021	1177	1218	1359	667	714	870	843	891	1044	1187	1232	1377
2001	635	705	857	867	916	1045	1216	1235	1325	645	710	865	870	917	1052	1220	1248	1341	674	735	884	888	934	1063	1238	1275	1357
2002	572	611	741	845	873	950	1148	1160	1195	582	622	754	853	881	955	1162	1173	1196	623	664	784	875	903	969	1188	1192	1209
2003	584	647	822	914	968	1141	1339	1367	1431	596	657	836	923	977	1152	1351	1383	1443	635	697	877	971	1030	1178	1382	1429	1473
2004	544	600	742	748	791	913	948	959	1006	552	600	749	743	794	919	961	965	1013	576	631	773	767	811	939	980	987	1029
2005	618	674	822	859	903	1035	1204	1242	1317	630	691	830	870	914	1047	1217	1252	1327	680	731	869	906	950	1075	1267	1299	1364
2006	601	645	807	923	963	1121	1507	1546	1715	602	649	819	934	974	1135	1513	1555	1724	631	685	855	958	1009	1176	1560	1606	1769
2007	641	676	795	852	877	882	930	929	924	650	687	797	874	878	882	934	933	926	673	726	812	868	869	893	941	938	938
2008	650	718	864	921	930	986	1083	1114	1194	661	726	875	926	940	999	1095	1122	1195	716	774	915	943	967	1050	1132	1154	1223

	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12	T13	T14	T15	T16	T17	T18	T19	T20	T21	T22	T23	T24	T25	T26	T27
2009	654	697	825	896	935	1016	1156	1187	1261	664	707	836	908	949	1030	1171	1201	1269	695	738	868	946	987	1073	1214	1239	1331
2010	636	681	828	857	900	1033	1243	1280	1401	641	695	836	863	908	1036	1248	1287	1407	662	712	862	879	923	1062	1260	1303	1426
2011	513	546	602	593	612	672	736	753	770	523	554	611	604	622	680	745	761	771	549	574	623	627	645	699	762	775	762
2012	723	770	922	1029	1087	1252	1668	1719	1860	729	777	935	1040	1095	1262	1678	1718	1870	749	800	975	1064	1121	1299	1696	1746	1893
2013	565	582	636	649	666	741	807	808	801	572	589	644	657	674	750	814	813	801	589	604	653	675	690	767	820	815	797

N.B : T1 = ROF0M0 ; T2 = ROF0M1 ; T3 = ROF0M2 ; T4 = ROF1M0 ; T5 = ROF1M1 ; T6 = ROF1M2 ; T7 = ROF2M0 ; T8 = ROF2M1 ; T9 = ROF2M2 ; T10 = R1F0M0 ; T11 = R1F0M1 ; T12 = R1F0M2 ; T13 = R1F1M0 ; T14 = R1F1M1 ; T15 = R1F1M2 ; T16 = R1F2M0 ; T17 = R1F2M1 ; T18 = R1F1M2 ; T19 = R2F0M0 ; T20 = R2F0M1 ; T21 = R2F0M2 ; T22 = R2F1M0 ; T23 = R2F1M1 ; T24 = R2F1M2 ; T25 = R2F2M0 ; T26 = R2F2M1 ; T27 = R2F2M2.

Source : DSSAT

Annexe XII : Rendements grain simulés en fonction des traitements de 1983-2013 (système mil en association avec le niébé)

	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12	T13	T14	T15	T16	T17	T18	T19	T20	T21	T22	T23	T24	T25	T26	T27
1983	620	673	760	816	832	824	886	872	910	632	686	768	829	843	832	901	882	883	662	717	784	841	855	841	905	876	852
1984	559	592	646	653	661	688	709	727	744	573	603	657	666	671	697	728	743	755	602	630	676	690	693	724	764	754	768
1985	594	646	816	836	893	1052	1254	1305	1469	605	658	830	852	908	1064	1264	1316	1481	632	689	863	886	941	1101	1285	1339	1515
1986	430	485	652	741	792	957	1287	1339	1483	435	493	661	748	801	964	1300	1351	1496	477	540	708	787	839	1002	1341	1392	1544
1987	609	662	825	930	991	1119	1420	1468	1624	614	663	838	944	1007	1128	1435	1484	1638	647	700	874	982	1044	1138	1470	1506	1657
1988	620	667	831	820	868	1032	1193	1240	1399	629	679	848	830	880	1044	1203	1251	1416	661	715	889	861	915	1081	1232	1284	1456
1989	536	554	623	616	637	703	781	800	848	545	564	631	624	644	709	786	805	850	567	583	653	646	666	724	796	817	848
1990	510	555	696	700	738	874	1032	1068	1192	520	565	709	708	748	885	1041	1078	1199	555	603	749	741	784	923	1074	1110	1214
1991	403	453	614	646	688	847	1002	1041	1178	419	471	626	658	706	861	1019	1056	1190	459	513	673	691	741	905	1055	1096	1232
1992	601	642	766	824	865	980	1218	1252	1357	614	655	777	837	878	993	1233	1267	1370	647	689	807	876	918	1033	1274	1309	1409
1993	639	682	825	807	851	998	1066	1092	1190	643	689	839	814	862	1007	1073	1100	1199	661	705	854	831	878	1026	1077	1109	1202
1994	624	677	826	817	860	997	1157	1188	1352	636	685	835	825	870	1005	1161	1195	1360	663	712	869	850	896	1033	1185	1256	1394
1995	492	508	565	568	584	633	716	736	789	497	515	574	577	595	644	725	745	797	510	536	600	604	621	667	743	761	801
1996	507	562	707	810	852	977	1340	1365	1444	521	577	716	818	859	983	1356	1378	1453	557	614	745	841	882	1009	1387	1411	1478
1997	600	640	776	777	818	943	1115	1146	1211	608	651	788	790	831	953	1122	1158	1223	637	683	824	817	859	979	1144	1182	1247
1998	587	625	753	757	795	910	1019	1049	1139	599	640	766	767	807	930	1032	1062	1156	625	666	800	794	834	958	1061	1091	1194
1999	720	774	944	1052	1114	1293	1704	1766	1949	725	782	951	1063	1122	1304	1719	1780	1959	746	804	996	1097	1161	1339	1754	1815	1998
2000	622	665	817	808	849	988	1150	1188	1323	627	672	825	813	855	996	1156	1195	1331	641	690	847	826	873	1021	1168	1212	1353
2001	618	669	813	827	866	996	1148	1162	1247	626	679	821	827	870	1003	1152	1181	1260	650	699	839	845	888	1018	1180	1209	1289
2002	543	580	705	792	820	892	1018	1031	1054	554	595	715	800	827	896	1030	1043	1054	591	631	747	821	847	908	1049	1056	1066
2003	520	579	724	802	855	975	1183	1210	1286	534	590	732	808	862	985	1193	1218	1298	575	624	763	840	895	1022	1224	1256	1349
2004	520	573	700	704	739	843	848	865	934	525	570	703	703	745	847	855	871	939	551	594	724	720	763	855	876	890	959
2005	571	617	735	781	825	949	1134	1166	1238	584	632	745	794	838	960	1144	1173	1250	627	664	787	833	878	997	1190	1205	1287
2006	569	614	769	879	922	1083	1439	1476	1641	578	627	782	887	933	1100	1444	1483	1649	601	654	813	917	970	1146	1479	1548	1684
2007	616	645	789	834	854	858	895	894	887	624	655	791	849	854	856	897	894	887	642	699	800	847	848	869	895	894	892
2008	617	676	781	833	840	924	1035	1062	1140	635	693	798	844	854	938	1048	1074	1148	674	728	847	875	896	976	1068	1092	1163

	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12	T13	T14	T15	T16	T17	T18	T19	T20	T21	T22	T23	T24	T25	T26	T27
2009	617	653	781	846	875	953	1120	1146	1205	625	662	789	871	893	971	1135	1164	1220	652	690	822	905	938	1012	1169	1194	1273
2010	605	641	774	806	851	982	1202	1241	1366	612	654	786	817	864	991	1214	1254	1376	630	673	809	832	877	1013	1224	1267	1391
2011	464	493	544	538	554	612	660	668	688	476	503	554	551	566	625	672	681	697	501	522	570	580	597	653	697	693	693
2012	676	720	883	982	1035	1203	1636	1687	1830	682	728	896	990	1044	1209	1646	1697	1841	705	753	929	1016	1071	1246	1666	1718	1870
2013	535	554	611	620	639	698	745	744	733	543	561	618	629	647	705	751	749	734	561	579	628	649	654	721	757	752	730

N.B : **T1** = ROF0M0 ; **T2** = ROF0M1 ; **T3** = ROF0M2 ; **T4** = ROF1M0 ; **T5** = ROF1M1 ; **T6** = ROF1M2 ; **T7** = ROF2M0 ; **T8** = ROF2M1 ; **T9** = ROF2M2 ; **T10** = R1F0M0 ; **T11** = R1F0M1 ; **T12** = R1F0M2 ; **T13** = R1F1M0 ; **T14** = R1F1M1 ; **T15** = R1F1M2 ; **T16** = R1F2M0 ; **T17** = R1F2M1 ; **T18** = R1F1M2 ; **T19** = R2F0M0 ; **T20** = R2F0M1 ; **T21** = R2F0M2 ; **T22** = R2F1M0 ; **T23** = R2F1M1 ; **T24** = R2F1M2 ; **T25** = R2F2M0 ; **T26** = R2F2M1 ; **T27** = R2F2M2.

Source : DSSAT

Annexe XIII : Dates des opérations culturales de l'essai 8A

Année	Date de semis	Date du 1^{er} sarclage + application fumier + application SSP + application 1^{ère} dose urée	Date de démariage	Date du 2^{ème} sarclage + application 2^{ème} dose urée	Date de récolte
1998	17 mai	17 juin		30 juillet	
1999	13 juin	17 juillet		20 août	22 octobre
2000	17 juin	14 juillet		15 août	17 octobre
2001	11 juillet	19 juillet		17 août	14 octobre
2002	04 juin	02 juillet	13 juillet	08 août	17 octobre
2003	28 mai	04 juillet	16 juillet	29 juillet	16 octobre
2004	07 juin	23 juin	13 juillet	04 août	06 octobre
2005	31 mai	27 juin	01 juillet	21 juillet	23 septembre
2006	18 juin	25 juillet		29 août	16 octobre
2007	19 mai	24 juillet	2 août	22 août	01 novembre
2008	12 juin	04 juillet		01 août	09 octobre
2009	20 juin	18 juillet	20 juillet	23 août	16 octobre
2010	04 juin	30 juin		02 août	04 octobre
2011	20 juin	15 juillet	25 juillet	11 août	17 octobre
2012	02 juillet	27 juillet	27 juillet	19 août	21 octobre
2013	25 juin	25 juillet	29 juillet	02 septembre	18 octobre

N.B : Compte tenu de la précocité de la variété de mil. Les oiseaux attaquent toujours mais en 2008 ça a été plus sévère.

Source : Centre Sahélien de l'ICRISAT, Sadoré (Niger)

Annexe XIV : Présentation du modèle DSSAT

Le modèle DSSAT (*Decision Support System for Agrotechnology Transfer*), système d'aide à la décision pour le transfert des technologies agricoles ou système agrotechnologique d'aide à la décision (Jones *et al.*, 2003) est un produit développé par IBSNAT (International Benchmark Sites Network for Agrotechnology Transfer), projet soutenu durant la décennie (1982-1993) par l'Agence américaine pour le développement international.

Il a été mis au point par l'Université de Géorgie (USA) en collaboration avec International Consortium for Agricultural System Applications (ICASA : <http://www.icasa.net>) (Hoogenboom *et al.*, 2003) et fait partie des outils d'aide à la décision en agriculture ayant pour objectif global, l'amélioration du système d'information dans la prévision des rendements.

Le modèle DSSAT est utilisé comme outil : de formation et d'éducation du fait qu'il donne des réponses interactives aux questions du type « qu'est-ce qui se passe si ... » afin de mieux comprendre l'influence de la saison (climat), de la localité (site et sol) et de la conduite technique sur les processus de croissance des plantes ; de recherche, pour développer des recommandations sur la gestion des cultures et pour aborder les questions de durabilité et d'environnement ; économique, pour augmenter la rentabilité et améliorer la commercialisation des intrants et politique, pour la prévision des surfaces cultivées et des rendements, et pour la planification de l'utilisation des terroirs.

Il est constitué d'un ensemble de programmes de gestion de base de données climatiques et édaphiques et des informations sur les pratiques culturales, ainsi que des modèles de simulation végétale de plusieurs cultures et des programmes de la stratégie saisonnière et d'analyse des risques (Uryasev *et al.*, 2010). DSSAT 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). Il peut également 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). Ainsi, il permet de comparer des réponses simulées aux résultats observés et de lier les modèles de culture avec des systèmes d'information géographiques (SIG).

Le principe du nouveau design de la version 4.5 du modèle DSSAT est une structure modulaire dans laquelle les composants sont structurés de manière à permettre le remplacement ou l'ajout facile de modules. Il comprend des modules « identical soil » pour la simulation de l'équilibre eau-azote-carbone du sol, le module « CENTURY- based soil carbon and nitrogen », l'outil de gestion des données climatiques « WeatherMan », l'outil des données expérimentales « ATCreate » pour l'entrée et l'édition des données détaillées sur la croissance, le développement

et le rendement, ainsi que les mesures concernant l'eau, l'azote et le carbone du sol, le programme graphique « GBuild » pour une représentation graphique des données expérimentales et des données simulées, un programme d'analyse saisonnière des données biophysique et économique des cultures saisonnières et le programme de diagnostic et d'évaluation « STATS » pour l'analyse statistique des données simulées et mesurées du développement végétatif et reproductif, du rendement et des composantes de rendement (Hoogenboom *et al.*, 2010). Cette dernière version du modèle de systèmes de culture comprend 28 cultures simulées (Jones *et al.*, 2003). Les modèles agricoles incorporés dans le système DSSAT comprennent (cf. figure) :

- la famille de modèles CERES pour les cultures céréalières des terres arides (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 famille de modèles CROPGRO pour les légumineuses à graines (CROPGRO-Soybean pour le soja, CROPGRO-Peanut pour l'arachide et CROPGRO-Dry Bean pour le haricot) ;
- la famille de modèles 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 et des fourrages.

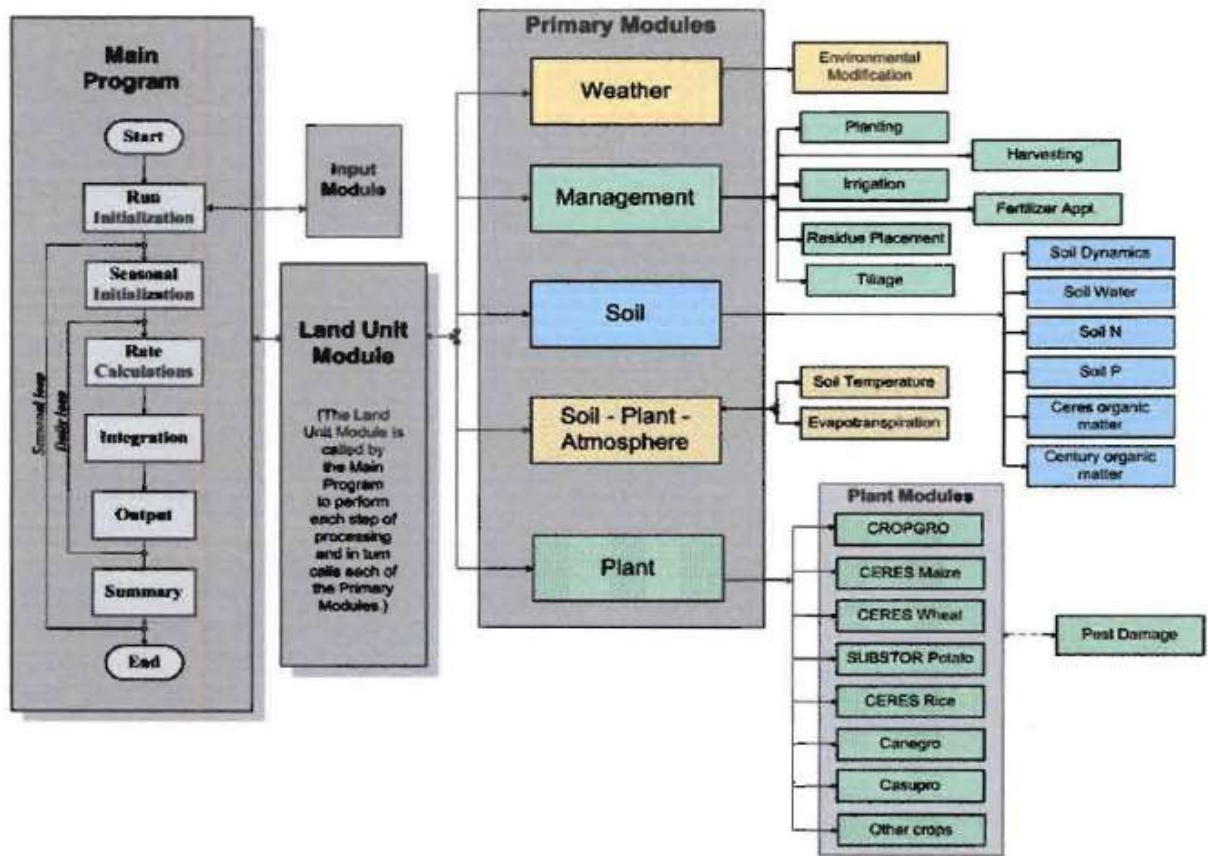


Figure : Modèle DSSAT montrant les principaux modules

Source : Jones *et al.* (2003)