

UNIVERSITE CHEKH ANTA DIOP DE DAKAR

ECOLE DOCTORALE SCIENCES DE LA VIE, DE LA SANTE ET DE L'ENVIRONNEMENT

FACULTE DES SCIENCES ET TECHNIQUES

Année : 2018

N° d'ordre : 201870



THESE DE DOCTORAT

En Biologie, Physiologie et Pathologie Végétales

Spécialité : Ecologie et Agroforesterie

Présentée par :

Komla Kyky GANYO

**Etude et modélisation des réponses de variétés de sorgho
(*Sorghum bicolor* (L.) Moench) à des stratégies contrastées
d'apports d'intrants**

Soutenue le 21 février 2019 devant le jury composé de :

Président :	M. Kandioura NOBA, Professeur titulaire, FST/UCAD, Sénégal
Rapporteurs :	M. Diégane DIOUF, Professeur titulaire, FST/UCAD, Sénégal M. Mbaye DIOP, Maître de Recherches, ISRA/DG, Sénégal Mme Mariama D. DIALLO, Maître de Conférences, UGB, Sénégal
Examineurs :	Mme Myriam ADAM, Chargé de recherches, CIRAD, France M. Bertrand MULLER, Chargé de recherches, CIRAD, France
Directeur de thèse :	M. Aliou GUISSSE, Professeur titulaire FST/UCAD, Sénégal
Co-Directeur de thèse :	M. Ndiaga CISSE, Maître de Recherche ISRA/CERAAS, Sénégal

Dédicace

Au feu Professeur Elie Léonard AKPO, qui a accepté mon dossier pour le master en Agroforesterie, Ecologie et Adaptation (AfEcA), début de ce parcours d'étude de 3^{ème} cycle

A mon défunt père Blaise Koffi GANYO, qui nous a quitté beaucoup trop tôt !

A ma mère Augustine Abra HINI, pour ses sacrifices. Ce travail est le couronnement de tes privations et prières pour me voir arriver à cette étape de l'ascension.

A ma sœur Afissétou AMADOU, merci « Dagan » d'avoir été toujours là pour moi.

A ma douce Enongandé Abl MANDJE et à notre fille Misericordia Kékéli GANYO pour la patience durant ces années d'absence et d'avoir toujours su m'arracher le sourire pendant les moments difficiles de cette thèse.

Remerciements

Cette thèse a été possible grâce à l'Office allemand d'échanges universitaires (DAAD) qui a accordé la bourse d'étude, au soutien financier du Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD) à travers l'Action Incitative, à l'Institut Togolais de Recherche Agronomique (ITRA) pour la facilité administrative, au Centre d'Étude Régional pour l'Amélioration de l'Adaptation à la Sécheresse (CERAAS) où se sont déroulés les travaux de recherche et à l'Université Cheikh Anta Diop à travers la Faculté des Sciences et Techniques et l'Ecole doctorale Science de la Vie, de la Santé et de l'Environnement (UCAD/FST/ED-SEV) où cette thèse a été inscrite.

Enfin! Après plusieurs mois intenses et épuisants au cours desquels on grandit finalement plus que pendant tous les mois qui ont précédé cette phase de rédaction, voici venu le moment de remercier ceux sans qui tout ceci n'aurait pas pu aboutir.

Tout d'abord, je tiens à remercier le Professeur Aliou Guissé mon directeur de thèse, pour m'avoir fait confiance il y a maintenant presque quatre ans, lorsque j'ai décidé d'entamer une thèse de doctorat après le master. Quand on sait à quel point les relations entre directeur de thèse et doctorant peuvent parfois être difficiles, je mesure la chance que j'ai eue d'avoir pu compter sur votre soutien, vos encouragements, votre disponibilité, tout au long de ma thèse. A travers vous, j'exprime aussi toute ma gratitude à l'endroit des autorités de l'UCAD, de la FST et tout le personnel de l'école doctorale Science de la Vie, de la Santé et de l'Environnement (SEV) en particulier à Madame Fama DIOP pour son accompagnement académique.

Je remercie sincèrement le Prof Kandoura NOBA pour avoir accepté de présider le jury de soutenance de cette thèse malgré ses nombreuses sollicitations et les Drs Diégane DIOUF, Mbaye DIOP et Mariama D. DIALLO, pour avoir accepté de rapporter cette thèse, pour leurs remarques et conseils avisés qui m'ont permis d'améliorer le manuscrit et de me poser encore plus de questions. C'est cela la recherche, un questionnement permanent.

Ma reconnaissance et profonde gratitude vont aux Drs Bertrand Muller et Myriam ADAM du CIRAD. Dr Muller est à l'origine de cette thèse et s'est engagé au quotidien pour un bon déroulement de la thèse. En première année d'abord, quand vous m'avez récupéré après quelques soucis avec le sujet initialement choisi pour la thèse, en deuxième année ensuite, lorsque vous avez su me montrer ce que parfois je voyais un peu moins nettement, et en troisième année, enfin, quand vous m'avez laissé prendre petit à petit mon envol. Merci pour ta confiance, ta disponibilité, tes conseils, tes facilités financières et tes contributions

scientifiques. Dr Adam, a été associée à ce travail dès le début avec une première mission ensemble sur le terrain à Nioro du Rip. Au départ de Dr Muller pour le Madagascar, Dr Adam a pris la relève avec ses séjours de supervision et de travail au CERAAS-Thiès (deux fois l'an) et m'a accueilli par trois fois en séjours scientifiques à l'INERA de Bobo Dioulasso (Burkina Faso). Avec sa culture et ses orientations scientifiques, elle a été une réelle source d'inspiration tout au long de cette thèse. Avec Dr Myriam Adam, j'ai fait mes premiers pas et approfondi mes connaissances en modélisation des cultures et R. Au-delà du scientifique, vous (Bertrand et Myriam) avez été aussi grand de cœur quand il s'est agi de créer un environnement de travail exceptionnel. Cette belle aventure n'aurait pas été possible sans vous deux. J'ai une dette de gratitude pour l'entière disponibilité dont vous avez fait preuve.

Mes sincères remerciements au Dr Ndiaga Cissé, Directeur du CERAAS et co-directeur de cette thèse pour m'avoir accueilli dans ce centre, les diverses contributions à ce travail et à travers lui, j'exprime ma gratitude au personnel scientifique de ce centre de recherche, Dr Daniel Fonceka, Dr Bassirou Sine, Dr Alain Audebert, Dr Mame Codou, Dr Khalil Kane, Dr Amy Bodian, Dr Oury Diallo et Dr Ndjido Kane, Ing. Marème Niang-Belko pour leurs appuis et conseils bienveillants. Aussi, mes remerciements vont à tout le personnel administratif, comptable et technique, MM Mawa Sène, Sala Dior, Lakhat Gadiaga, Abdou Latif Diack, Khalidou Ba, Mbaye Ndoeye Sall, Cheikhou Dramé, Idrissa Cissé, Maguette Seye, Mmes Mariama Senghor (maman DAAD), Thérèse Faye (Tante DAAD), Marie Fatou Sané, Elisabeth et Khady Diop, Joséphine Fofana, Rachelle Djiboune, Rose Diouf. Vous avez été une famille pour moi. Merci pour le rôle que chacun a tenu dans cette belle aventure humaine.

Aux chauffeurs du CERAAS notamment Aly Égué Ka, Ibrahima Diouf, Saliou Gning, Malick Ndiaye, Sidibé, Makha Dembelé et Jean-Michel Manga, merci de m'avoir fait découvrir le terroir sénégalais.

Les essais agronomiques ont été gérés sur le terrain avec la collaboration de plusieurs techniciens et stagiaires qu'il me plaît de remercier infiniment. Ce sont Mbaye Sarr Diop, Fa Massiré Badji, Espoir Gaglo, Thierno Ndiaye, Limamou Khoulé, Lama Diallo, Mamino Sané, Bounama Mbengue, Demba Dia, Aimé Kantoussan, Médoune Diop, Joseph Dasylva, Mamadou Niasse, Ama Lo, Abdou Aziz Diagne, Amadou Ba et Abdou Wahab Diouf.

J'adresse aussi mes remerciements aux Drs Aliou Faye et Jean Sogbédji pour leurs soutiens et conseils dans la recherche de la bourse de thèse du DAAD.

Merci également à Komlavi II Adjégan, Komi Sanou et Kodjo Noumonvi, pour leurs multiples relectures minutieuses à la virgule près.

Les travaux de thèses, ce sont aussi de chaudes « empoignades » et échanges scientifiques avec les camarades étudiants en Master et Doctorat. Ces discussions ont contribué à mon développement scientifique. Je voudrais remercier ici Dr Roger Bayala, Dr Emile Agbangba, Dr Thierry Tovignan, Dr Paul Martial Kouakou, Dr Halimé Mahamat Hissene (« Ma maman »), Dr Joël Nguépjop, Dr Aissatou Sambou, Dr Komivi Dossa, Dr Zaiya Zazou, Dr Cyril Diatta, Dr Ghislain Kanfany, Dr Odjo Tirburce, Dr Nofou Ouedrago, Dr Eyanawa Akata (puisque tu insistes), Dr Dodzi Dagnon, Dr Maguate Diop, Malick Ndiaye (qui soutiendra sa thèse presque en même temps que moi), , Oberline Fokou, Wilfried Yehouessi, Katina Olodo, Marie-Thérèse Mofini, Ange Zoclanclounon, Nadré Gbedié, Joseph Dembélé, Kodjo Gbédévi, Marie Ali Mmadi, Alyr Hachim, Mame Balla Ndiaye, Elisabeth Diatta, Awa sarr, Jodelle Quenum et Kadiatou Touré.

Durant mes différents séjours au Burkina Faso, j'ai bénéficié d'une hospitalité inestimable de la famille Kouakou. Que Patrice, Adjara, Orlane et Dylan reçoivent ma profonde gratitude pour l'accueil et les beaux instants passés sous leur toit. Que Dieu vous bénisse !

Toute ma gratitude et merci aux familles Dégo et Alonyo pour leur soutien multiforme depuis le collège jusqu'à cette étape de mon cursus. Qu'ils trouvent ici, le fruit de leur investissement.

Merci à la famille Djiba (Issa, Amy, Mohamed et Djénaba) qui a toujours manifesté l'hospitalité sénégalaise (la Téranga) à mon endroit et à toute la communauté étrangère du CERAAS lors des manifestations festives.

Sur ce chemin de quête de la connaissance, j'ai rencontré des frères et sœurs qui constituaient pour moi la famille au Sénégal. Je veux dire un merci infini au grand frère Hodo-Abalo Tossim pour toutes ces années passées ensemble, les échanges, conseils et d'avoir supporté parfois mes avis divergents sur des questions d'intérêts communs ; à Hermann Somé pour l'ambiance cordiale durant ces années de thèse. A la communauté togolaise de Thiès, merci de m'avoir accueilli parmi vous, de m'avoir ressourcé fréquemment à travers des mets togolais que vous me présentiez et des conseils des aînés Dr Joseph Adom et Révérends Pères Eric Alakou et Trésor Assamagan.

Enfin, je suis conscient que plusieurs noms n'apparaissent pas dans cette rubrique. Que les uns et les autres trouvent en cette œuvre le signe de mes reconnaissances.

Résumé

La variabilité pluviométrique très importante des zones sahéliennes et soudano-sahéliennes et la déficience de leurs sols en nutriments impliquent des incertitudes sur la production du sorgho. L'objectif de cette thèse est de générer des conseils sur la fertilisation minérale aux agriculteurs en relation aux informations météorologiques. Cette étude a porté sur (i) l'étude en station des réponses de variétés de sorgho à différentes doses et périodes d'application de NPK (15-15-15) et urée, (ii) la calibration et évaluation du modèle de culture DSSAT dans la reproduction des réponses du sorgho à la fertilisation azotée, et (iii) l'exploration et définition de fenêtres optimales de premières applications d'engrais. Pour ce faire, 4 variétés de sorgho à maturité contrastée ont été soumises à 5 modalités de fertilisation dont deux tardives sous différents régimes pluviométriques à Nioro du Rip et Sinthiou Malème en 2015 et 2016. Sur la base des résultats de développement et croissance puis de rendements, le modèle DSSAT-CSM-CERES-Sorghum (DSSAT v4.7) a été calibré et évalué en conditions de stress minimal d'azote et d'eau puis en conditions de stress azoté contrastées (incluant des dates d'apport tardif). Enfin, l'outil d'analyse saisonnière de DSSAT a été utilisé pour explorer et définir les dates de fertilisation appropriées en cas de démarrage tardif de la pluviométrie à partir des données climatiques journalières de 67 ans. Les résultats montrent que les plants bénéficiaient de l'apport tardif mais cela dépendait de la teneur en N du site, de la quantité d'eau reçue après l'apport tardif et du cycle de la variété. En un démarrage tardif de la pluie, le producteur ne perd pas de biomasse ou de grains avec un report de la fertilisation jusqu'à 34 jours après semis. Les dates optimales pour commencer une fertilisation tardive sont du 28-33 jas indépendamment de l'année et du cycle de la variété à Nioro du Rip. A Sinthiou Malème, elles sont pour une variété à maturité précoce comprises entre 19-29 jas, entre 22-27 jas pour une variété à maturité intermédiaire et entre 24-34 jas pour une variété à maturité tardive indépendamment de l'année. Ces dates correspondent au stade tallage à montaison pour les variétés de cycle court (85-95 jours) ou moyen (105-135 jours) et tallage pour les variétés de cycle long (>135 jours). L'effet du stress azoté lié à un apport tardif sur la production de grain simulée, était moins prononcé comparé aux données observées, ce qui nécessite une amélioration de DSSAT-CSM-CERES-Sorghum.

Mots clés : Variabilité pluviométrique, fertilisation tardive, Début de saison tardif, DSSAT-CSM-CERES-Sorghum, *Sorghum bicolor* ((L). Moench), Zones soudano-sahéliennes.

Abstract

In Sahelian and Sudano-Sahelian Zones, rainfall variability and soil nutrients deficiency affect sorghum production. This study aims at generating advices to farmers in relation with climate information. It focused on (i) the in-station study of sorghum varieties responses at different rates and application times of NPK (15-15-15) and urea (ii) calibration and evaluation of DSSAT crop model in the reproduction of sorghum responses to nitrogen fertilization and (iii) the exploration and definition of optimal windows for first fertilizer applications. Four contrasted sorghum varieties were submitted to five (5) fertilization applications including two (2) late fertilizer applications under different rainfall regimes in “Nioro du Rip” and “Sinthiou Malème”. Based on development, growth and yields results, the DSSAT-CSM-CERES-Sorghum (DSSAT v4.7) model was calibrated and evaluated under minimal N and water stress conditions and under N stress conditions (including late application). The seasonal analysis tool was used to explore and identify the optimal fertilization dates in case of late start of rainfall based on 67-year daily climate data. Results showed that plants benefitted from late application. However, it depended on soil N content, water recorded after late application and variety. No loss of grain or biomass was recorded by delaying fertilizer application until 34 days after sowing. The optimal late fertilization dates are from 28 to 33 days after sowing (das) irrespective of the year and variety at Nioro du Rip. At Sinthiou Malème, they are from 19-29 das for early maturity varieties, from 22-27 das for intermediate maturity varieties and from 24-34 das for late maturity varieties irrespective of year. These dates correspond to tillering to stem extension stage for short (85-95 days) and medium (105-135 days) cycle varieties and tillering for long (>135 days) cycle varieties. The effect of N stress related to late application on simulated grain was less pronounced compared to the observed data. This requires an improvement in DSSAT-CSM-CERES-Sorghum.

Key words: Rainfall variability, late fertilization, Late start of growing season, DSSAT-CSM-CERES-Sorghum, *Sorghum bicolor* (L). Moench), Soudano-Sahelian zones.

Table des matières

Dédicace	i
Remerciements	ii
Résumé	v
Abstract	vi
Sigles et Abréviations.....	x
Liste des tableaux	xii
Liste des figures.....	xiii
Introduction générale.....	1
Introduction générale.....	2
Chapitre 1 : Revue de littérature.....	6
1.1 Généralités sur le sorgho	7
1.1.1 Origines, diffusion et systématique	7
1.1.2 Importance du sorgho	7
1.2 Fertilité des sols et fertilisation des céréales	8
1.2.1 Notion de fertilité des sols	8
1.2.2 Eléments minéraux	9
1.2.3 Fertilisation des céréales.....	9
1.2.4 Fertilisation tardive des céréales	11
1.2.5 Fertilisation des céréales et pluviométrie	14
1.3 Modélisation des cultures.....	15
1.3.1 Les modèles empiriques	15
1.3.2 Les simulateurs dynamiques de croissance et de rendement ou modèles mécanistes	16
1.3.3 Le simulateur de croissance et de rendement DSSAT.....	17
1.4 Conclusion.....	20
Chapitre 2 : Réponses agronomiques de 4 variétés de sorgho à différentes stratégies contrastées d'apports d'intrants (NPK et urée) sous différents régimes hydriques.....	22
2.1 Résumé	23
2.2 Introduction	24
2.3 Matériel et méthodes	26
2.3.1 Sites expérimentaux.....	26
2.3.2 Matériel végétal	29
2.3.3 Dispositifs expérimentaux et conduite d'essais.....	29
2.3.4 Collecte de données.....	32
2.3.5 Analyses des données	33
2.4 Résultats	33

2.4.1 Les conditions expérimentales	33
2.4.2 Analyse des interactions V*E*F	34
2.4.3 Effets de la fertilisation tardive sur le rendement en grains	36
2.4.4 Effets de la fertilisation tardive sur le développement des biomasses.....	40
2.5 Discussion	42
2.5.1 Principales conclusions	42
2.5.2 Limites de l'étude.....	44
2.4.3 Recommandations	45
2.6 Conclusion.....	45
Chapitre 3 : Calibration et évaluation des performances du modèle DSSAT-CSM-CERES-Sorghum dans la simulation des réponses du sorgho à des apports contrastés d'azote	
3.1 Résumé.....	48
3.2 Introduction	49
3.3 Matériel et méthodes	50
3.3.1 Description du DSSAT-CSM-CERES-Sorghum	50
3.3.2 Les expérimentations.....	53
3.3.3 Calibration.....	55
3.3.4 Evaluation du modèle	56
3.3.5 Analyse de la réponse du modèle au stress azoté	57
3.4 Résultats	58
3.4.1 Calibration et évaluation.....	58
3.4.2 Simulation de la biomasse finale et du rendement grain en conditions de stress azoté (T1, T3, T4 et T5) des quatre variétés dans les six environnements	68
3.5 Discussion	70
3.5.1 Qualité des données d'expérimentation et de simulation	70
3.5.2 Faiblesses et pistes d'amélioration de DSSAT-CSM-CERES-Sorghum dans la simulation de réduction de rendements liée à un stress azoté.....	72
3.6 Conclusion.....	75
Chapitre 4 Application de DSSAT-CSM-CERES-Sorghum pour définir les fenêtres de dates de fertilisation pour un début de saison déficitaire : Cas de Nioro du Rip et Sinthiou Malème au Sénégal	
4.1 Résumé.....	78
4.2 Introduction	79
4.3 Matériel et méthodes	80
4.3.1 Configuration des simulations	80
4.3.2. Analyse de scénario.....	81
4.3.3 Analyses de données.....	83

4.4 Résultats	84
4.4.1 Caractéristiques climatiques	84
4.4.2 Analyse des variabilités saisonnières de la biomasse finale et du rendement grain	86
4.5 Discussion	94
4.5.1 Caractérisation de la pluviosité	94
4.5.2 Optimisation de la date d'application d'engrais/azote.....	94
4.6 Conclusion.....	97
Chapitre 5 : Discussion générale	99
5.1 Objectif et démarche méthodologique.....	100
5.2 Principaux résultats obtenus	100
5.2.1 Avantages de la fertilisation tardive	100
5.2.2 Les modèles de culture, un atout indéniable.....	101
5.3 Recommandations	103
5.4 Insuffisances du travail.....	104
Conclusion générale et perspectives.....	106
Conclusion générale	107
Perspectives	108
Références bibliographiques	109
Annexes	125

Sigles et Abréviations

Agrhymet : le Centre Régional Agrhymet (CRA) est une institution de recherche et enseignement en climatologie, agroclimatologie et hydrologie du Comité Permanent Inter-Etats de Lutte contre la Sécheresse dans le Sahel (CILSS)

ANSD : Agence Nationale de la Statistiques et de la Démographique (Sénégal)

APSIM: *Agricultural Production Systems sIMulator*

ASS: Afrique Sub-Saharienne

CATIMO: *CA*nadian *T*imothy *M*odel

CERAAS : Centre d'Etude Régional pour l'Amélioration de l'Adaptation à la Sécheresse

CERES: *Crop Estimation through Resource and Environment Synthesis*

CIRAD : Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement (France)

CropSyst : *CROPping SYSTems simulation model*

CSM: Cropping System Model

CV: Coefficient de Variation

DAAD : *Deutscher Akademischer AustauschDienst* (Office allemand d'échanges universitaires)

DSSAT: *Decision Support System for Agrotechnology Transfer*

ED-SEV : Ecole Doctorale-Science de la Vie, de la Santé et de l'Environnement (FST UCAD)

EPIC: *Erosion Productivity Impact Calculator*

FAOSTAT: *Food and Agriculture Organization Corporate Statistical Database*

FST : Faculté des Sciences et Techniques de l'UCAD

ha: Hectare

IBSNAT: *International Benchmark Sites Network for Agrotechnology Transfer*.

INERA : INstitut de L'Environnement et de Recherches Agricoles (Burkina Faso)

IRD : Institut de Recherche pour le Développement (France)

ISRA : Institut Sénégalais de Recherches Agricoles (Sénégal)

ITRA : Institut Togolais de Recherche Agronomique (Togo)

JAS : Jour Après Semis

JC : Jésus-Christ

K : Potassium

kg : Kilogramme

LAI : *Leaf Area Index* (Indice de surface foliaire)

MAE/DA : Ministère de l'Agriculture et de l'Elevage/Direction de l'Agriculture (Sénégal)

N: Azote

NDEF1: *N DEFiciency for photosynthesis per unit area (1)*

NDEF2: *N DEFiciency for expansion growth processes (2)*

NDEF3: *N DEFiciency for relative tillering rate (3)*

NPK : Azote-Phosphore-Potassium

NRMSE : *Normalized Root Mean-Squared Error* (Racine de l'erreur quadratique moyenne normalisée)

P : Phosphore

Ppm : Partie Pour Million

rMAE : *Relative Mean Absolute Error* (Moyenne de l'erreur absolue relative)

RMSE : *Root Mean-Squared Error* (Racine de l'erreur quadratique moyenne normalisée)

RUE : *Radiation Use Efficiency* (Efficience de l'utilisation de la Radiation)

SLPF : *Soil fertility factor* (facteur de fertilité du sol)

STICS : Simulateur mulTIdisciplinaire pour les Cultures Standard

STPC : *Partitioning to stem growth as a fraction of potential leaf growth* (Le coefficient de répartition de la matière sèche en tige en fonction de la croissance potentielle des feuilles)

UCAD : Université Cheikh Anta Diop de Dakar, Sénégal

UGB : Université Gaston Berger de Saint Louis, Sénégal

% : Pourcentage

°CJ : degré Celsius Jour

Liste des tableaux

Tableau 1.1 : Quelques exemples de simulateurs de croissance et de rendement	16
Tableau 2.1: Conditions du sol avant les expérimentations	27
Tableau 2.2 : Caractéristiques des variétés de sorgho utilisées.....	29
Tableau 2.3: Indicateurs caractérisant les six environnements	34
Tableau 2.4 : Analyse statistique des effets des facteurs variété, environnement et fertilisation, et de leurs interactions, sur les rendements, les biomasses s et les indices de récolte	35
Tableau 3.1 : Résumé des essais utilisés pour la calibration et évaluation du modèle	54
Tableau 3.2 : Valeurs calculées à partir des données expérimentales de quelques coefficients génétiques.....	55
Tableau 3.3 : Coefficients génétiques développés pour la calibration des 4 variétés de sorgho et utilisés pour l'évaluation	59
Tableau 3.4 : Indices de performances du modèle pour la calibration et évaluation des dynamiques de LAI, biomasse et nombre de feuilles apparues	64
Tableau 3.5 : Coefficients de performance du modèle pour la simulation du rendement grain et biomasse finale des différentes variétés	66
Tableau 4.1 : Dates de fertilisation testées	82
Tableau 4.2 : Paramètres statistiques des séries pluviométriques de chaque site	85

Liste des figures

Figure 1.1 : Absorption de N, P et K au cours du cycle de croissance pour un variété de sorgho de 95 jours en moyenne.....	11
Figure 1.2 : Représentation schématique du modèle DSSAT	19
Figure 2.1: Situation géographique des sites d'essais	28
Figure 2.2 : Pluviométrie, irrigations et températures moyennes durant les expérimentations	28
Figure 2.3: Photo des essais (A) avant fertilisation tardive et (B) après fertilisation tardive ..	30
Figure 2.4: Stades de développement des différentes variétés de sorgho dans les différentes expérimentations	31
Figure 2.5 : Rendements moyens en grains en fonction des sites et des traitements de fertilisation	37
Figure 2.6: Comparaison de rendements grains des quatre variétés sous traitement recommandé (T2) et traitement retardé (T4) en fonction des quantités d'eau reçues après application tardive	38
Figure 2.7: Gains et pertes de rendements liés aux fertilisations tardives (T4 et T5) en fonction des variétés et conditions environnementales (WLA25, N).....	39
Figure 2.8: Dynamiques des biomasses végétatives en fonction des traitements dans les différents environnements	41
Figure 2.9: Biomasses végétatives moyennes à la récolte selon les variétés et les traitements de fertilisation.....	42
Figure 3.1 : Comparaison des dates de floraison (points rouges) et maturité (points noirs) observées et simulées des quatre variétés dans les six environnements.....	60
Figure 3.2 : Simulation de la dynamique de l'indice de surface foliaire pour toutes les variétés en conditions optimales	62
Figure 3.3 : Simulation de la biomasse végétative (F+T, Feuilles et tiges) au cours du cycle pour toutes les variétés en conditions optimales	63
Figure 3.4 : Simulation du nombre de feuilles apparues (Nb. feuilles) durant le cycle pour toutes les variétés en conditions optimales	64
Figure 3.5 : Simulation de la biomasse finale de toutes les variétés en conditions optimales.	67
Figure 3.6 : Simulation du rendement grain de toutes les variétés en conditions optimales. ..	68
Figure 3.7 : Comparaison des rendements observés et simulés de biomasse et grain pour T1, T3, T4 et T5 des 4 variétés dans les 6 environnements.....	69
Figure 3.8 : Niveau du stress azoté simulé par le modèle pour les différentes modalités de fertilisation	70
Figure 3.9 : Réduction de rendements biomasse et grain en cas de stress azoté (T1-3-4-5) comparé au rendement du niveau de stress minimal (T2).....	74
Figure 3.10 : Exemple de stress azoté et concentration d'azote dans la biomasse végétative et grain simulés pour Soumalembe.	75
Figure 4.1 : Cumul pluviométrique annuel de 1950 à 2016 à Nioro du Rip et Sinthiou Malème	86
Figure 4.2 : Rendements et variance associée à la biomasse finale (A) et au grain (B) moyens pour les différentes dates de fertilisation et variétés à Nioro du Rip et Sinthiou Malème.....	88
Figure 4.3 : Réduction ou gain moyen et erreur standard de rendements biomasse (trait en pointillet) et grain (trait plein) pour les différentes dates de fertilisation pendant les années humides à Nioro du Rip et Sinthiou Malème	89

Figure 4.4 : Réduction ou gain moyen et erreur standard de rendements biomasse (trait en pointillet) et grain (trait plein) pour les différentes dates de fertilisation pendant les années normales à Nioro du Rip et Sinthiou Malème	90
Figure 4.5: Réduction ou gain moyen et erreur standard de rendements biomasse (trait en pointillet) et grain (trait plein) pour les différentes dates de fertilisation pendant les années sèches à Nioro du Rip et Sinthiou Malème	91
Figure 4.6 : Azote prélevé simulé sous les différentes dates de fertilisation en conditions pluviales à Nioro du Rip (A) et Sinthiou Malème (B)	92
Figure 4.7 : Azote lessivé simulé sous les différentes dates de fertilisation en conditions pluviales à Nioro du Rip (A) et Sinthiou Malème (B)	93

Introduction générale

Introduction générale

L'agriculture joue un rôle important dans le développement socio-économique (Irz et Roe, 2000; World Bank, 2005). Elle constitue la principale activité du secteur primaire au Sénégal et dans les autres pays de l'Afrique Sub-Saharienne (ASS). Elle emploie près de 70% de la population en ASS (World Bank, 2000). L'agriculture dans cette zone reste fortement tributaire du climat notamment de la pluviométrie.

Selon Hansen (2002), le climat est le plus important facteur qui gouverne la production alimentaire, faisant de l'agriculture l'activité humaine la plus climato-dépendante. L'ASS est caractérisée par une extrême variabilité du climat comme en témoignent les impacts des sévères sécheresses observées à la fin du 20^{ième} siècle (Hulme *et al.*, 2001). La sévérité des incertitudes climatiques est particulièrement forte en ASS où l'agriculture pluviale est la principale source d'alimentation et de revenu (Ingram *et al.*, 2002; Defrance *et al.*, 2017). Ces incertitudes climatiques sont essentiellement liées à la variabilité pluviométrique qui induit l'apparition de poches de sécheresse durant la saison de culture (Casenave et Valentin, 1989; Usman et Reason, 2004) et/ou des débuts et fins de saisons des pluies incertains (Omotosho *et al.*, 2000 ; Graef et Haigis, 2001). Selon un rapport du Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC), le changement climatique (CC) résultant de l'augmentation des gaz à effet de serre va accentuer l'incertitude pluviométrique et les évènements extrêmes telles les sécheresses, les inondations, et l'augmentation de la température dans certaines parties du monde. En Afrique, le changement et la variabilité climatiques vont entraîner des pressions supplémentaires sur l'eau (sa disponibilité, accessibilité et demande) et les systèmes mixtes pluviaux semi-arides seront affectés au Sahel ainsi que les systèmes mixtes de cultures pluviales pérennes et de hauts plateaux dans les Grands Lacs et le reste de l'Afrique de l'Est (IPCC, 2007). La variabilité pluviométrique et le CC affecteront tout à la fois la disponibilité de la production alimentaire, la stabilité des approvisionnements alimentaires, l'utilisation des aliments, l'accès à la nourriture et les prix alimentaires partout dans le monde (Schmidhuber et Tubiello, 2007). Faire face à l'incertitude climatique, en particulier aux incertitudes pluviométriques, est un challenge pour les producteurs et le secteur agricole, et notamment pour les petits exploitants qui ont peu de marges techniques et financières. En ASS, en réaction aux risques qu'ils perçoivent concernant l'investissement dans les intrants en raison des conditions météorologiques erratiques et imprévisibles, les paysans s'adaptent globalement en n'utilisant pas ou très peu d'engrais et en cultivant des variétés traditionnelles adaptées à la sécheresse mais au potentiel limité, ce qui a pour conséquence que les productions restent faibles, ce même

lorsque les conditions climatiques (pluviométriques) s'avèrent favorables (Amadou *et al.*, 1999; Ingram *et al.*, 2002).

Le système agraire en ASS est dominé par la culture des céréales qui constituent la base de l'alimentation de millions de personnes. La production de céréales notamment du sorgho dans cette zone est fortement affectée par des précipitations inadéquates ou mal réparties ainsi que par les faibles niveaux d'azote (N) et de phosphore (P) dans les sols (Bationo *et al.*, 2003). Dans ce contexte de déclin de la productivité des sols et d'incertitudes pluviométriques, une gestion appropriée des engrais minéraux (N, P, K) en relation aux prévisions et réalités climatiques pourrait être une clé pour maximiser ou optimiser les rendements de cultures puisque l'azote et l'eau sont deux des plus importants facteurs de production des cultures (Gheysari *et al.*, 2009; Kiani *et al.*, 2016; Mon *et al.*, 2016). En effet, de nombreux auteurs (Sultan *et al.*, 2010; Roudier *et al.*, 2011; Sultan et Gaetani, 2016) indiquent que les prévisions saisonnières pourraient aider à conseiller les paysans sur le choix des variétés, des dates de semis et l'usage des fertilisants. Roudier *et al.* (2011) ont montré (pour les conditions d'Afrique de l'Ouest) que (i) les prédictions de longues saisons de pluies et des années humides excluent l'utilisation des variétés de mil à cycle court (en relation aux problèmes biotiques survenant lors de la maturation des épis) et que (ii) l'impact de la fertilisation en année humide est positif sur les rendements du mil. Par conséquent, des prévisions concernant le climat à venir dans la saison pourraient aider les paysans africains à prendre des décisions stratégiques cruciales pour réduire leur vulnérabilité et augmenter la rentabilité des exploitations (Sultan *et al.*, 2010). De plus, McCown *et al.* (1991) et Keating *et al.* (1993) ont montré que les cultivateurs de maïs auraient intérêt à ajuster leurs pratiques culturales aux conditions pluviales tôt dans la saison, c'est-à-dire en appliquant les engrais seulement au cours des "bonnes" saisons (années favorables avec des quantités de pluies suffisantes et bien réparties).

Afin de tirer profit des observations et prévisions du climat présent et futur, celles-ci doivent être prises en compte dans une approche d'agriculture intelligente. Ainsi, retarder ou réduire l'application d'engrais minéraux en tenant compte des pluies reçues et annoncées (prévisions) pourrait être une stratégie appropriée pour optimiser l'efficacité des apports minéraux, améliorer le rendement agricole, et réduire les pertes potentielles des investissements en intrants. Les études sur la fertilisation tardive, en particulier l'apport tardif d'azote sur les céréales, ont été abordées par nombre d'auteurs (Abad *et al.*, 2004; Velasco *et al.*, 2012; Amiri *et al.*, 2014; Blandino *et al.*, 2015; Xue *et al.*, 2016). Les résultats rapportés par ces auteurs sont variables en ce qui concerne l'augmentation du rendement grain ou de la quantité de grains

dépendant des années, du sol, de la technique d'apport (épandage au sol ou application foliaire), de la dose et des cultures. Ces études sur la fertilisation tardive n'ont à notre connaissance pas exploré les réponses de différentes variétés de sorgho d'Afrique de l'Ouest à des stratégies d'apports d'engrais qui pourraient être dictées par l'appréciation des conditions pluviométriques attendues et/ou vécues.

Pour évaluer les effets potentiels de stratégies de fertilisation retardée et/ou réduite, les modèles de simulation peuvent non seulement apporter une précieuse contribution à la compréhension des processus qui déterminent les réponses des cultures en relation à l'utilisation des ressources dans différents environnements, mais aussi contribuer à l'exploration de différentes stratégies sous différents scénarii (MacCarthy et Vlek, 2012; MacCarthy *et al.*, 2018). En effet la modélisation des cultures est maintenant reconnue comme un moyen efficace de simuler les interactions de différents processus physiologiques lorsqu'ils réagissent aux changements environnementaux et déterminent le rendement des cultures (Asseng *et al.*, 2013; Bassu *et al.*, 2014). C'est ainsi que les modèles de simulation de cultures ont été largement utilisés pour évaluer les variétés et les options de gestion (Ines *et al.*, 2001; Hammer *et al.*, 2005; Liu *et al.*, 2010, 2013), l'impact et l'adaptation au changement climatique en ce qui concerne la productivité et performance environnementale des agroécosystèmes (Grossi *et al.*, 2013; Rosenzweig *et al.*, 2013). Cependant, ils restent bien entendu imparfaits à simuler toutes les différentes interactions dans les contextes sub-sahariens (Lobell et Burke, 2010).

Il est donc nécessaire de développer des connaissances sur les réponses de sorghos cultivés dans différentes régions d'Afrique de l'Ouest à des fertilisations tardives et d'améliorer les capacités des modèles de cultures à simuler ces interactions géotypes*environnement*pratiques culturales dans le contexte sub-saharien.

Le présent travail fait l'hypothèse que l'apport des engrais minéraux en tenant compte de l'installation de la pluie en début de saison permettrait de maximiser ou optimiser les rendements. Il vise en outre, à répondre aux questionnements scientifiques suivants :

- (i) quels sont les facteurs environnementaux qui favorisent l'effet positif d'une fertilisation tardive et/ou réduite ?
- (ii) les modèles de cultures en occurrence DSSAT peuvent-ils reproduire l'effet d'une fertilisation tardive ?

(iii) de combien de jours ou à quel stade de développement, l'apport de la première application d'engrais profite-t-il au sorgho en un début de saison déficitaire ?

L'objectif finalisé de notre recherche est de pouvoir générer des conseils sur la fertilisation aux agriculteurs en relation aux informations météorologiques. Spécifiquement la thèse vise :

(1) à étudier les réponses de plusieurs variétés de sorgho à différentes stratégies contrastées d'apports d'intrants (NPK et urée),

(2) à calibrer et évaluer le modèle de culture DSSAT dans la reproduction des réponses du sorgho à la fertilisation azotée,

(3) à explorer et évaluer l'intérêt des modalités de fertilisation tardive via des simulations sur des jeux de données climatiques historiques.

Le présent document est structuré en 5 chapitres dont le corps de thèse (chapitre 2 à 4) est rédigé sous un format d'article scientifique. Le premier chapitre présente des synthèses bibliographiques sur le sorgho, la fertilisation des céréales et la modélisation des cultures. Il aborde les travaux antérieurs sur la fertilisation tardive, l'interaction pluviométrie et fertilisation et la modélisation du sorgho avec DSSAT. Le second chapitre décrit les travaux de terrain réalisés à Nioro du Rip et Sinthiou Malème en 2015 et 2016 et rapporte l'étude des réponses de quatre (4) variétés de sorgho à différentes stratégies contrastées d'apports de NPK et urée, dont des apports réduits et tardifs (cf. objectif spécifique 1). Il définit les conditions favorables au gain de rendement avec la fertilisation tardive. Le troisième chapitre confronte le modèle de culture DSSAT aux données expérimentales des deux années, évalue et identifie les points d'améliorations du modèle pour une meilleure reproduction des observations (cf. objectif spécifique 2). Le quatrième chapitre s'intéresse à l'exploration et l'évaluation de l'intérêt de différentes modalités de fertilisation via des simulations sur des jeux de données climatiques historiques (cf. objectif spécifique 3). Enfin, le chapitre cinq (5) est une discussion générale ressortant les résultats majeurs et les limites de cette étude. Il débouche sur une conclusion et les perspectives pour une meilleure prise en compte de la variabilité pluviométrique dans la gestion de la fertilisation et une bonne représentation des observations par le modèle de culture DSSAT.

Chapitre 1 : Revue de littérature

1.1 Généralités sur le sorgho

1.1.1 Origines, diffusion et systématique

Le sorgho est l'une des espèces les plus anciennement cultivées dans le monde. Son origine n'est pas définie avec certitude. Cependant, certains auteurs s'accordent à dire qu'il aurait été domestiqué il y a environ 6000 ans avant JC dans le Nord-Est de l'Afrique, entre le Soudan et l'Éthiopie, en bordure sud du Sahara où les plus vieux restes archéologiques ont été trouvés (de Wet et Huckabay 1967; Wenderof *et al.*, 1992). Par la suite, trois centres géographiques ont été identifiés comme des sites à partir desquels le sorgho s'est diversifié sur le continent africain : (1) l'Afrique de l'Ouest, donnant la race guinea, (2) l'Afrique de l'Est, donnant les races caudatum et durra, et (3) l'Afrique du Sud, donnant la race kafir (Habindavyi, 2009).

Le sorgho domestique appartient à l'embranchement des Spermaphytes, sous-embranchement des Angiospermes, à la classe des Monocotylédones, à l'ordre des Poales, à la famille des Poacées ou Graminées, à la sous-famille des Panicoideae, au genre *Sorghum* (Chanterreau et Nicou, 1991). On distingue chez le sorgho cultivé cinq (5) races fondamentales à savoir bicolor, guinea, caudatum, kafir et durra. Il est diploïde avec pour nombre chromosomique $2n=20$.

1.1.2 Importance du sorgho

Le sorgho (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) est une céréale cultivée dans les régions tropicales et tempérées à travers le monde. Il est du point de vue production, la cinquième céréale cultivée dans le monde après le blé, le maïs, le riz et l'orge (Jain *et al.*, 2010). Le sorgho est généralement cultivé à la fois pour son grain, utilisé en alimentation humaine et animale, et sa paille utilisée comme fourrage. Il constitue un important aliment de base pour des millions de personnes des régions arides et semi-arides d'Afrique, Asie et Amérique du Sud (Gueye *et al.*, 2016). Le grain peut être consommé entier ou décortiqué et réduit en poudre pour faire de la bouillie, de la « pâte » (akoumè, tô selon les pays), du couscous ou encore des beignets. La farine de sorgho est de nos jours vulgarisée et utilisée en panification en Afrique. Le grain peut être fermenté pour donner des boissons alcoolisées : bière (tchoukoutou ou dolo) ou du vin de sorgho. Les résidus de la plante (tiges, feuilles et panicules égrenées) sont, suivant la race du sorgho, la variété et la fertilité du sol, d'importance variable. Outre leur usage alimentaire, ils peuvent également servir de combustible ou de matériau de construction (Dehaynin, 2007). A cela s'ajoutent d'autres utilisations du sorgho, à caractère industriel ou artisanal, qui donnent lieu à la sélection de types particuliers :

- sorghos papetiers dont la tige riche en fibres est utilisée pour la fabrication de papier ou de panneaux de construction ;
- sorghos à grains riches en amidon utilisés pour préparer des colles, des adhésifs ou du dextrose ;
- sorghos sucriers qui peuvent produire des bio-carburants ou qui, selon la composition en oses du jus de la moelle, donnent des sirops ou du sucre cristallisable (Tovignan *et al.*, 2015);
- sorghos à balai dont la hampe fructifère (panicule) dépouillée de ses grains sert à faire des balais durs ;
- sorghos tinctoriaux dont les tiges et feuilles riches en pigments anthocyanés donnent après broyage et macération une teinture rouge utilisée en tannerie ou en poterie (Chantereau et Nicou, 1991; CIRAD, 2002).

La production mondiale en 2016 s'élève à 63 930 558 tonnes. Les Etats Unis à eux seuls détiennent 19% de la production mondiale et sont suivis du Nigeria (11%) et du Soudan (10%) (FAOSTAT, 2016). L'Afrique détient plus de la moitié (55%) de la production mondiale (Chepng'etich *et al.*, 2014; Wu *et al.*, 2014). Pour les campagnes agricoles de 2014-2015 et 2015-2016 les productions nationales du Sénégal ont été d'environ 102 323 (8% de la production céréalière) et 188 500 tonnes (9% de la production céréalière) sur des superficies totales de 125 066 et 200 737 ha respectivement. C'est la 4ème céréale produite au Sénégal. (ANSD, 2016).

1.2 Fertilité des sols et fertilisation des céréales

1.2.1 Notion de fertilité des sols

La notion de fertilité d'un sol est assimilée à un jugement porté sur le fonctionnement d'un système biologique dont les composantes sol, climat et plante sont interactives. Plusieurs définitions sont données dans la littérature à la fertilité du sol. Feller *et al.* (2003) définit la fertilité du sol comme son état en ce qui concerne la quantité et la disponibilité des éléments essentiels à la croissance des plantes. Trichet *et al.* (1999) définissent le même terme comme étant la somme des facteurs physiques, chimiques et biologiques déterminant l'aptitude du sol à soutenir une production. Selon Morel (1989), la fertilité d'un sol est la facilité avec laquelle la racine végétale peut bénéficier dans ce sol des facteurs suffisants de croissance: chaleur, eau, éléments chimiques et organiques. De ces trois définitions, la fertilité peut se comprendre comme « les conditions d'un potentiel de production végétale ».

En général la fertilité des sols sous culture constante baisse dans le temps. En Afrique, au fil des décennies, les petits producteurs, ont retiré de leurs sols de grandes quantités de nutriments sans utiliser suffisamment de fumier ou d'engrais minéraux pour reconstituer le sol. Cela s'est traduit par un épuisement moyen annuel très élevé de 22 kg d'azote, 2,5 kg de phosphore et 15 kg de potassium par hectare de terres cultivées (Sanchez *et al.*, 1997). Cet épuisement des sols en nutriments entraîne la baisse de la fertilité des sols qui constitue une contrainte majeure à la productivité des systèmes de culture familiale (Giller *et al.*, 2011). La restauration de la fertilité des sols sous culture est parfois difficile, notamment lorsque les fonctions biologiques et physiques sont fortement affectées (Gupta et Germida, 1988; Dominy et Haynes, 2002). La fertilité de ces sols doit alors être fortement soutenue par des apports en fertilisants notamment des trois éléments majeurs que sont l'azote (N), le phosphore (P) et le potassium (K).

1.2.2 Eléments minéraux

Le sol contient des éléments minéraux qui sont la nourriture de la plante. Ces éléments sont très nombreux. On en distingue cependant trois (3) majeurs à savoir l'azote (N), le phosphore (P) et le potassium (K) qui sont consommés en quantités élevées (macroéléments) et qui déterminent le niveau de rendement. Le N commande l'assimilation chlorophyllienne et est le principal facteur qui régit quantitativement la production agricole (Moisier *et al.*, 2004). P assure le transport d'énergie dans les phénomènes de photosynthèse et de métabolismes divers. Il favorise en particulier le développement racinaire et la nodulation chez les légumineuses et se révèle le facteur de précocité des végétaux (Nyle et Ray, 2008). K est d'une part un facteur de vigueur et de résistance aux maladies ou à la sécheresse et d'autre part le facteur régulateur des fonctions chlorophylliennes de la plante. K est donc l'élément d'équilibre, de santé et de développement qualitatif de la plante (Scherer *et al.*, 2003).

Les autres éléments (oligoéléments) sont aussi vitaux pour la plante mais en bien moindre quantité. Ils interviennent dans le métabolisme de la plante. On peut en distinguer particulièrement 5 à savoir le bore (Bo), le calcium (Ca), le magnésium (Mg), le fer (Fe) et le cuivre (Cu).

1.2.3 Fertilisation des céréales

Les études des effets de la fertilisation sur la productivité des céréales sont très abondantes et variées. L'apport d'azote (N) minéral ou organique permet généralement d'augmenter les rendements des cultures (Ayoub *et al.*, 1994; Tran *et al.*, 1997; Tran et Tremblay, 2000; Elmi

et al., 2002; Ma *et al.*, 2005; Ziadi *et al.*, 2008; Gagnon et Ziadi, 2010). La demande mondiale d'engrais azoté est dictée par la production en grains de céréales (Cassman *et al.*, 2002). Selon ces auteurs, durant la période 2001-2002, 60 % d'engrais azoté mondial ont été utilisés pour la production de céréales, et notamment pour trois céréales spécifiques (riz, blé et maïs) qui ont contribué à hauteur de 56% de la production céréalière.

La stratégie de fractionnement des applications excluant la fertilisation en un seul apport de l'urée en grande quantité dans la production des cultures est l'un des moyens d'accroître l'efficacité de l'utilisation de N. Les apports multiples durant la saison de N semblent augmenter l'efficacité de l'utilisation de N tout au long de la croissance de la plante (Wuest et Cassman, 1992; Mullen *et al.*, 2003). Le fractionnement de N permet en effet de fournir des quantités spécifiques de nutriments à la culture pendant les périodes de pointe de la croissance et contribue par ailleurs à réduire le lessivage de nitrate dans le sol (Fageria et Baligar, 1999). Les travaux de Wolf et van Keulen (1989) ; Bowen et Baethgen (1998), Godwin et Singh (1998) et Agreste (2005) ont ainsi montré qu'une bonne répartition des apports de nutriments, surtout d'azote, au cours du cycle de la culture (céréale), permet de limiter les pertes, d'éviter la suralimentation et d'améliorer la composition protéinique des grains. Les besoins en azote varient au cours du cycle de développement. Plutôt modestes au début, ces besoins s'intensifient en début de montaison pour s'atténuer progressivement jusqu'à la maturité, marquant la fin de l'absorption des nutriments et de la croissance des plantes (Figure 1.1). En riziculture de bas-fonds, les taux d'efficacité de N, 30 à 50% (résultats obtenus en station) sous les tropiques, avec une efficacité agronomique de 15 à 25 kg de grains produits pour 1 kg de N, dépendent de la saison, du niveau des rendements, de la dose et du fractionnement des apports d'azote (Yoshida, 1981; De Datta, 1986). Les travaux de Smalberger *et al.* (2006) ont aussi montré qu'une déficience en P réduit la réponse des cultures à la fertilisation minérale à cause de l'absence d'effets synergiques entre P et N.

Traditionnellement, la dose optimale d'engrais azotés a été la dose se traduisant par un rendement économique maximal (Jongkaewwattana *et al.*, 1993). Une bonne planification des dates d'application en combinaison avec des doses adéquates de N est cruciale pour minimiser les pertes d'azote et améliorer l'efficacité de N (De Datta et Buresh, 1989).

Selon van Duivenbooden *et al.* (1996) pour une production de 1000 kg/ha de grains de sorgho, il faut une absorption par la plante de 31 kg de N, 4kg de P et 26kg de K avec des taux de recouvrement de 35% et 15% respectivement pour N et P. Le potassium fourni est quasi

entièrement utilisé par la plante. Pour ces auteurs, le pourcentage ou taux de recouvrement devrait être augmenté, en améliorant la capacité compétitive de la culture. Cela peut être réalisé, par exemple, par une application fractionnée d'azote, ajustée en fonction du schéma d'absorption de la culture.

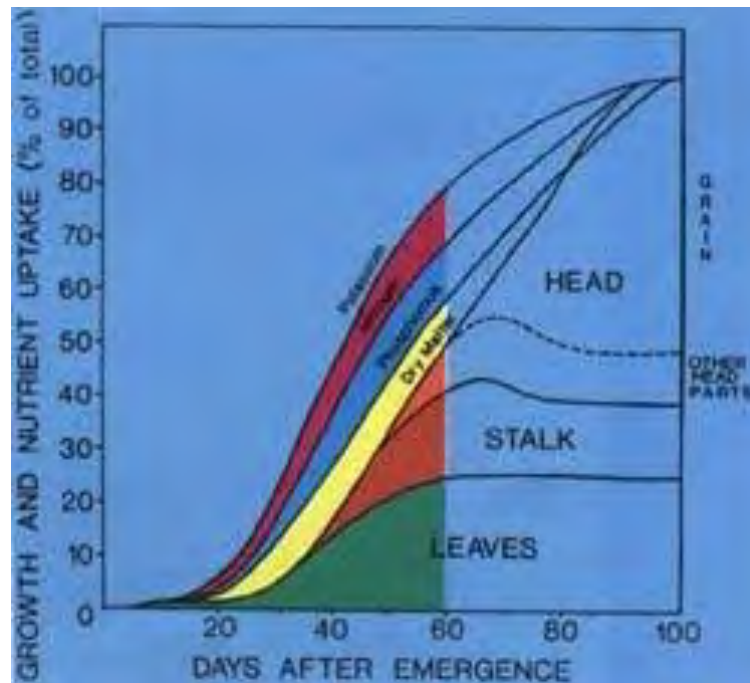


Figure 1.1 : Absorption de N, P et K au cours du cycle de croissance pour un sorgho de 95 jours en moyenne.

Source : Vanderlip (1993)

1.2.4 Fertilisation tardive des céréales

Le fractionnement d'engrais est comme nous venons de le voir une pratique fortement recommandée pour optimiser l'absorption des nutriments par les plantes et ainsi améliorer les rendements. On sait de plus que l'apport précoce et « important » de fertilisants accroît le risque de perte des nutriments, notamment du N dans la rhizosphère, par lessivage et/ou dénitrification (Velasco *et al.*, 2012). Malheureusement la littérature sur la fertilisation tardive en N, P et K des céréales est peu abondante, et les auteurs qui ont abordé cette problématique dans leurs études se sont plus focalisés sur les apports azotés tardifs vu que l'azote est le pivot de la fumure chez les céréales. Nous présentons ci-après les résultats de ces études pour les différentes céréales majeures.

Blé

La période de la fertilisation affecte les rendements en grains des céréales (Perez *et al.*, 1996). L'apport fractionné de l'azote par exemple, accroît généralement le rendement, ou au pire n'a aucun effet. Smith *et al.* (1991) ont observé chez le blé, une augmentation de la teneur en protéine avec l'application foliaire de N et la plus grande augmentation a été obtenue avec l'application à l'entrée en floraison. Cependant, cette application n'a eu aucun effet significatif sur le rendement grain. Woolfolk *et al.* (2002) ont conclu que l'application foliaire avant ou immédiatement après la floraison comparée à une absence d'apport (témoin à blanc) peut significativement améliorer la teneur en protéines du grain de blé d'hiver mais n'a pas d'effet croissant ou décroissant significatif sur le rendement grain. Mi *et al.* (2000) en investiguant l'effet de l'apport d'azote post-anthèse (floraison mâle et femelle) du blé sur l'absorption de N et la teneur en protéines des grains, ont trouvé que l'application additionnelle de N durant la floraison améliorerait l'absorption post-anthèse d'azote et la teneur en protéine. Cependant cette amélioration varie en fonction des cultivars. Par ailleurs d'autres auteurs (van Sanford et MacKown, 1987; Ehdaie et Waines, 2001) ont rapporté que l'apport additionnel de N en post-anthèse accroît l'absorption de N mais n'améliore pas la teneur en protéines. Enfin les études de Bodson *et al.* (2003) ont montré que l'apport de l'azote en deux (2) fractions avec impasse sur l'apport au tallage, plutôt que trois (3) fractions a permis d'améliorer légèrement le rendement en paille alors que le nombre d'épis au mètre carré (m²) est identique. De même, les coefficients réels d'utilisation de l'azote des engrais ont été meilleurs avec les apports en deux fractions. Les rendements ont aussi varié en fonction des précédents culturaux (betterave et froment). Ils ont suggéré de faire un apport plus important au stade dernière feuille. Plusieurs auteurs, dont Powlson *et al.* (1989), Wuest et Cassman (1992), Ayoub *et al.* (1994) et Woolfolk *et al.* (2002), ont conclu que l'apport d'engrais azoté au moment du stade floraison est efficace pour accroître l'absorption post-florale de N, le rendement en grains et la teneur en protéines.

Riz

Certaines études ont exploré le fractionnement et les doses de fertilisation en azote couvrant les stades végétatif et reproductif du riz (Wilson *et al.*, 1989; Fageria et Baligar, 1999). L'application fractionnée et en temps opportun d'azote peut améliorer la réponse d'une culture à l'azote en particulier à des doses élevées (Fageria et Baligar, 1999). L'application de l'azote au-delà de l'initiation paniculaire chez le riz est connue pour accroître la teneur en protéine, la blancheur et la translucidité des grains (Taira, 1970; Taira *et al.*, 1970; Seetanun et De Datta,

1973; Perez *et al.*, 1996). L'application foliaire de l'urée (Nishizawa *et al.*, 1977) ou des triazines ou de substituts d'urée (De Datta *et al.*, 1972) à l'épiaison accroît la teneur en protéines contenues dans le riz. Perez *et al.* (1996) dans leur étude sur l'effet de l'application tardive d'azote sur le rendement, la teneur en protéine et qualité du riz ont considéré trois modalités d'apports d'azote : (i) basal¹ + initiation paniculaire, (ii) basal + plein tallage + initiation paniculaire, (iii) basal + plein tallage + initiation paniculaire + floraison. Ils rapportent que sur deux de leurs trois expérimentations, l'apport d'azote à la floraison a accru le rendement du riz paddy de 6 % et de 17 % le rendement de riz blanc. Fageria et Baligar (1999) en étudiant l'influence de différents fractionnements de la fertilisation azotée sur le rendement du riz de bas-fonds et ses composantes ont défini 6 traitements de fertilisation dont deux avec apports tardifs : T4 = 0 N au semis + 1/3 N au repiquage + 1/3 N à l'initiation paniculaire + 1/3 N à la floraison ; et T6 = 0 N au semis + 1/3 N à l'initiation du tallage + 1/3 N au « démarrage » phase reproductive + 1/3 N à la floraison. Ils comparent ces traitements aux 4 autres dont les apports commencent au semis. Ils rapportent que la période d'application a affecté les rendements en biomasse aérienne et grains. Les 2 traitements avec apports tardifs de N (c'est-à-dire avec 1/3 N à la floraison) ont eu les productions en grains les plus faibles. Cependant, ils ont montré une concentration en N significativement plus élevée comparés à des traitements avec apport d'azote au semis qui ont donné un rendement en grain plus élevé. Ils concluent que l'apport de N durant la phase reproductive n'améliore pas les rendements grains du riz bas-fonds.

Maïs

Pour le maïs, des apports variés de fertilisants minéraux (NPKS et urée) à différents stades ont permis d'accroître le rendement et les composantes de rendements de différentes variétés dans la région de Lubumbashi en République démocratique de Congo (Useni *et al.*, 2012, 2014). Cependant selon Nyembo *et al.* (2013) les différents fractionnements d'azote qu'ils ont testés n'améliorent pas les rendements, ni leurs composantes, des variétés de maïs Unilu et Pan 53 en République démocratique du Congo. Selon les mêmes auteurs, le fractionnement d'azote est même une pratique à déconseiller étant donné que cette stratégie présente un faible indice d'acceptabilité. D'autres auteurs tels Keating *et al.* (1991, 1993) au Kenya, ont observé que l'application fractionnée de l'azote (N) sur le maïs, a à la fois des effets positifs et négatifs selon la distribution de la pluie. Dans l'ensemble, il n'y avait aucun gain à fractionner l'application de 40 kg de N (dose recommandée au Kenya) en deux doses de 20 kg au semis et 28 jours après

¹ Basal : apport d'urée 1 jour avant repiquage du riz

semis. Par contre, un petit bénéfice ou gain a été noté avec l'application de 10 kg de N au semis suivie de 30 kg de N au 28^{ème} jour après semis lorsque la pluviométrie a excédé 150 mm entre le semis et 28^{ème} jour après semis.

Sorgho

A notre connaissance, seuls les travaux de Amiri *et al.* (2014) ont abordé la fertilisation tardive chez le sorgho. Ils rapportent qu'à mesure que l'utilisation de l'azote augmentait (dose croissante), le rendement en grains, le nombre de grains par plante, le nombre de grains par panicule, le poids de 1000 grains et le rendement en paille augmentaient significativement avec l'apport de N 25% au semis, 50% à la montaison et 25% à la floraison et que ce fractionnement, comparé aux apports de (i) 100% de N au semis et (ii) 50% N au semis et 50% N à la montaison, a donné le meilleur rendement.

1.2.5 Fertilisation des céréales et pluviométrie

La connaissance du niveau de fertilité des sols et la maîtrise des quantités d'engrais à apporter, conjuguées à la quantité de pluie ou d'eau disponible dans le sol améliorent ou accroissent le niveau de rendement. Les travaux de Brassard (2007) ont révélé que les rendements du maïs grain variaient en fonction de l'année, de la région et de la dose d'azote apportée dans les régions du Québec. Les travaux de Rötter et van Keulen (1997) ont montré que les risques et opportunités associés à la production du maïs et à l'utilisation des fertilisants sous conditions pluviales au Kenya, résultent principalement de la variabilité des pluies et des effets possibles de variations du rapport coût/prix c'est-à-dire engrais/récolte. Ces auteurs affirment aussi que la réponse des différentes variétés de maïs (variétés à maturité précoce, moyenne, tardive et précoce à moyenne) aux traitements de fertilisation (N0P0, N60P26, N120P52 et 10 tonnes de fumier) a varié en fonction des années « normales » de pluviométrie (quantité suffisante) dans les huit zones agroécologiques considérées pour l'étude. Les rendements maxima ont été atteints sous condition d'humidité du sol optimale. Chez le blé, l'efficacité de l'utilisation de l'azote apporté après le stade d'élongation de la tige, dépend de la disponibilité de l'eau (Fischer, 1993; Zebbarth *et al.*, 2007). Par ailleurs, en conditions de non stress hydrique aux jeunes stades de croissance telle élongation de la tige, l'application du N au semis peut se traduire par une baisse de rendement comparée à une application au tallage (López-Bellido *et al.*, 2005; Barbieri *et al.*, 2008). Stewart et Faught (1984), McCown *et al.* (1991) et Wafula *et al.* (1992) ont suggéré une flexibilité des paysans dans les pratiques culturales en ajustant celles-ci aux conditions pluviales tôt dans la saison, en n'appliquant par exemple, les fertilisants qu'au

cours des « bonnes » années c'est-à-dire à démarrage et distributions de pluie normaux. Dans cette approche, la décision sur la densité de semis et la quantité de fertilisants de fonds est basée sur les précipitations précoces alors que l'épandage d'urée et la possible réduction de la densité de semis par le démariage sont basés sur les précipitations ultérieures. Face à toutes ces stratégies possibles d'application d'azote (différentes doses et dates) et de réponse de la plante à ces stratégies en fonction de la pluie reçue, l'utilisation de la modélisation peut être un moyen pour mieux appréhender la réponse de la plante.

1.3 Modélisation des cultures

Le développement de l'informatique a permis l'essor des « modèles de cultures » qui reproduisent le comportement d'une culture et sa réponse à différentes conditions (dont les contraintes) du milieu modulées par des actes techniques (Affholder, 2001). Les premiers travaux de modélisation de cultures, initiés par Hanks *et al.* (1969), van Keulen et van Beek (1971), ont porté sur la simulation des flux hydriques dans le système sol-plante-atmosphère afin d'optimiser la gestion de l'irrigation. Il existe deux principaux types de modèles pour prédire la croissance ou le rendement des cultures qui sont les modèles empiriques et les simulateurs dynamiques de croissance et de rendement.

1.3.1 Les modèles empiriques

Les modèles empiriques sont fondés sur des observations ou mesures au champ plutôt qu'axés sur des concepts théoriques, et se basent sur des relations statistiques (régressions statistiques simples ou multiples) existant entre des variables dépendantes (floraison, rendements) et indépendantes (degrés-jour, régime hydrique). A terme, leur objectif est de prédire les variables dépendantes. Ils sont davantage orientés vers l'application et sont surtout utilisés par les intervenants du milieu rural pour estimer les rendements des cultures. Ce type de modèle fournit une prédiction du rendement pour une région donnée et cette prédiction est rarement transposable à d'autres régions (Lepage et Bourgeois, 2012). Combinés à d'autres sources d'informations, par exemple venant de la télédétection, les modèles empiriques peuvent permettre de prédire la biomasse et le rendement à partir d'un modèle simple d'efficacité d'utilisation de la radiation solaire (Monteith, 1977) et tenant compte des indicateurs de stress hydrique et azoté (Liu *et al.*, 2010).

1.3.2 Les simulateurs dynamiques de croissance et de rendement ou modèles mécanistes

Les simulateurs dynamiques de croissance et de rendement, dits modèles fonctionnels ou mécanistes, sont des modèles conçus à partir des connaissances de processus biologiques et physiologiques des cultures et ils sont validés avec des observations en parcelles expérimentales. Ils sont élaborés à partir d'équations mathématiques représentant ces processus et le taux d'accroissement des structures végétales (feuilles, tiges, graines et racines) en fonction des différentes variables indépendantes telles que la température, les précipitations et la radiation solaire (Lepage et Bourgeois, 2012). Par ailleurs, ces modèles intègrent aussi les types et propriétés du sol, les caractéristiques des cultures ou génotypes, et la conduite des opérations agronomiques. Différents simulateurs de croissance et de rendements ont été élaborés au fil des années par différentes équipes de recherche (Tableau 1.1). De même que les modèles empiriques, les modèles mécanistes ont été développés pour fonctionner sur des unités de simulations (plantes, sols, conduite de la culture) homogènes.

Tableau 1.1 : Quelques exemples de simulateurs de croissance et de rendement

Modèles	Pays d'élaboration	Cultures	Utilisations potentielles	Références
APSIM	Australie	Céréales, oléagineux, légumineuses, canne à sucre, chanvre, coton, luzerne et plantes fourragères	-Simulation du développement et de la croissance des cultures, -Simulation des bilans hydriques, azotés et phosphorés, - Aide à la prise de décisions à l'échelle de l'exploitation	McCown <i>et al.</i> , 1996 Keating <i>et al.</i> , 2003
CropSyst	Etats-Unis	Blé, maïs, lupin, orge, soja et sorgho	-Simulation du développement et de la croissance des cultures, -Simulation des bilans hydriques, azotés, Conduite de la culture, de la fertilisation et de l'irrigation	Stockle <i>et al.</i> , 1994 et 2003
CATIMO	Canada	Graminées fourragères	-Prédiction de la croissance et de la valeur nutritive	Bonesmo et Bélanger, 2002a, 2002b; Jing <i>et al.</i> , 2011
DSSAT	Etats-Unis	Céréales, oléagineux, légumineuses, plantes fourragères,	-Simulation du développement et de la croissance des cultures, -Simulation des bilans hydriques et azotés,	Jones <i>et al.</i> , 2003

Modèles	Pays d'élaboration	Cultures	Utilisations potentielles	Références
		pomme de terre, riz et tomate	- Conduite de la culture, de la fertilisation et de l'irrigation	
EPIC	Etats-Unis	Céréales, oléagineux, légumineuses, plantes fourragères, légumes et petits fruits	-Simulation de la croissance et du rendement des cultures, -Simulation de l'érosion,	Williams <i>et al.</i> , 1983 .
STICS	France	Céréales légumineuses, plantes fourragères, betterave sucrière, fraisier, laitue, luzerne, pomme de terre et tomate	-Simulation du développement, de la croissance et du rendement des cultures, -Simulation de bilans hydriques et azotés, -Conduite de la culture, de la fertilisation et de l'irrigation	Brisson <i>et al.</i> , 1998, 2003
SUCROS	Pays Bas	Céréales, légumineuses, Canne à sucre, Patate douce	-Simulation du développement, de la croissance et du rendement des cultures, Simulation de bilans hydriques et azotés, -Conduite de la culture, de la fertilisation et de l'irrigation	Spitters <i>et al.</i> (1989)

Source : adapté de Lepage et Bourgaeois (2012)

1.3.3 Le simulateur de croissance et de rendement DSSAT

1.3.3.1 Description

Le Decision Support System for Agrotechnology Transfer-DSSAT (Jones *et al.*, 2003) est un des modèles de simulation de cultures qui simule le rendement des cultures et la dynamique de croissance en fonctionnant au pas de temps journalier. Ce modèle utilise des données du sol, du climat, des cultures, et des pratiques de gestion. L'accumulation de biomasse est liée à la capture quotidienne et à l'utilisation des ressources « eau », « rayonnement solaire » et « nutriments du sol ». La réponse de la plante à ces facteurs environnementaux (stimuli) dépend de la phase phénologique (stade de développement) dans laquelle elle se trouve. La succession des phases phénologiques, qui constitue le cycle de croissance, est pilotée par les températures (et les durées du jour pour les variétés photopériodiques). Lorsqu'une graine est semée, elle absorbe l'humidité du sol pour germer. Puis la plantule émerge, un nombre de feuilles est produit, celles-ci interceptent le rayonnement, et l'énergie absorbée est convertie en assimilats, c'est-à-dire en

« masse carbonée ». Ces assimilats sont ensuite réparties dans les différentes parties de la plante pour faire augmenter les biomasses.

1.3.3.2 Origine

Initialement, le DSSAT a été développé par un réseau international de scientifiques coopérant sur un projet de transfert de technologie intitulé « International Benchmark Sites Network for Agrotechnology Transfert » (IBSNAT, 1993; Jones *et al.*, 1998; Tsuji, 1998; Uehara, 1998) pour faciliter l'utilisation de modèles de cultures dans une approche systémique de recherche agronomique. Son développement initial a été motivé par la nécessité d'intégrer les connaissances sur les sols, le climat, les cultures, et la gestion des cultures afin de prendre de meilleures décisions sur le transfert de la technologie de production d'un endroit à un autre où les sols et le climat diffèrent (IBSNAT, 1993).

La première version publiée de DSSAT (v2.1) est sortie en 1989. D'autres versions additionnelles ont été élaborées en 1994 (v3.0) (Tsuji *et al.*, 1994) et en 1998 (v3.5) (Hoogenboom *et al.*, 1999). Le DSSAT v4.5 (Hoogenboom *et al.*, 2010) est un modèle du DSSAT qui comprend 28 cultures simulées, dont le mil et le sorgho ; la v4.6 est sortie en 2015 (Hoogenboom *et al.*, 2015). La dernière version du DSSAT est la v4.7 (Hoogenboom *et al.*, 2017).

1.3.3.3 Fonctionnement

Le DSSAT est un ensemble de programmes indépendants (Figure 1.2) de gestion de base de données climatiques, édaphiques et d'informations sur les pratiques culturales, ainsi que des modèles de simulation végétale de plusieurs cultures et des programmes d'analyse saisonnière et de risques (Uryasev *et al.*, 2010). La base de données inclut des données concernant le climat, le sol, les conditions expérimentales et mesures observées de même que des informations sur les génotypes afin d'appliquer le modèle à différentes situations. Le logiciel aide les utilisateurs à préparer les différents fichiers de variables d'entrée et variables observées, à comparer les résultats simulés aux observations sur le terrain et à évaluer le degré de confiance dans les modèles ou de déterminer si des modifications sont nécessaires pour mieux représenter la croissance et le développement de la plante étudiée (Jones *et al.*, 1998). De plus, les programmes contenus dans DSSAT permettent aux utilisateurs de simuler des options pour la gestion des cultures sur un certain nombre d'années afin d'évaluer les risques associés à chaque option.

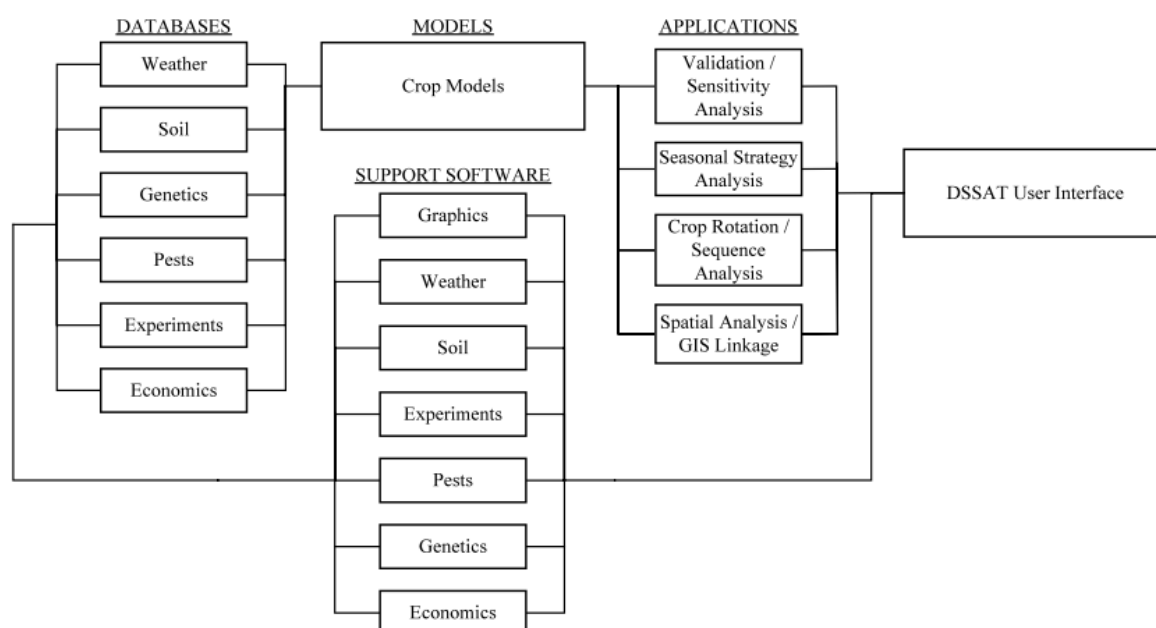


Figure 1.2 : Représentation schématique du modèle DSSAT

Source : Jones *et al.* (2003)

1.3.3.4 Quelques applications du DSSAT pour le sorgho

Utilisant le modèle DSSAT-CSM-CERES-Sorghum, Alagarswamy et Virmani (1996) ont analysé le risque associé aux applications d'azote pour une production pluviale dans 4 localités en Inde et ont conclu que le bénéfice brut était sensible à la variabilité des précipitations. Castrignano *et al.* (1997) ont utilisé des données de lysimètre pour évaluer la performance de DSSAT-CSM-CERES-Sorghum dans un environnement sec, venteux et fortement exposé aux rayonnements et ont noté des difficultés pour une estimation précise de l'évaporation du sol. En ce qui concerne les cultures sèches dans les grandes plaines de l'état de Kansas aux USA, Staggenborg et Vanderlip (2005) ont conclu que le DSSAT-CSM-CERES-Sorghum pouvait fournir aux agronomes des informations précieuses (dates et densité de semis, choix de variétés, rotation des cultures, effet des propriétés des sols) sur la faisabilité des modifications de systèmes de culture avant de mener des essais sur le terrain. Le modèle DSSAT-CSM-CERES-Sorghum a été associé à un système d'information géographique (SIG) pour faciliter la gestion des engrais azotés dans les zones tropicales semi-arides de l'Inde (Singh *et al.*, 1993). Ces auteurs concluent que la combinaison de DSSAT-CSM-CERES-Sorghum et SIG permet de constituer une base d'informations sur les systèmes d'exploitation pouvant être mise à jour pour produire des statistiques actualisées sur les modes actuels d'utilisation des terres, leur production et leur évolution dans le temps, en ce sens qu'elle constitue aussi un outil de décision à court et long terme par l'étude des effets des changements économiques, technologiques ou

climatiques ou des besoins substantiels sur la production régionale et les besoins en ressources. D'autres applications de DSSAT-CSM-CERES-Sorghum vont des modes de gestion des cultures à l'estimation des impacts potentiels du changement climatique. Considérant deux sols représentatifs de différents types d'exploitation au Ghana, MacCarthy *et al.* (2010) ont simulé avec une série de 15 ans de données climatiques et ont conclu qu'une utilisation accrue d'engrais azotés (0 à 120 kg/ha dans les champs de case et champs de brousse) profiterait à l'efficacité de l'utilisation de l'eau et aux rendements en grains. Dans une étude sur les effets de l'irrigation sur la croissance du sorgho sucré et le rendement en éthanol, Miller et Ottman (2010) ont utilisé DSSAT-CSM-CERES-Sorghum pour estimer la profondeur d'enracinement pour la planification de l'irrigation.

Il ressort de cet aperçu sur les études de modélisation avec DSSAT-CSM-CERES-Sorghum, qu'elles ont été variables et ont porté sur l'optimisation des pratiques agricoles (choix des dates de semis, de densité, variétés) le suivi de la fertilité des parcelles et du potentiel de production, la croissance racinaire et la planification de l'irrigation mais aussi sur quelques faiblesses du modèle dans la simulation de l'évaporation du sol. En somme, ces travaux ont montré que DSSAT-CSM-CERES-Sorghum est un outil d'aide à la décision. Cependant, aucun de ces travaux n'a abordé la modélisation des apports tardifs d'azote ou l'exploration et la définition des dates de fertilisation en lien avec les précipitations en début des saisons culturales.

1.4 Conclusion

Le sorgho est une céréale d'importance capitale pour les populations des régions arides et semi-arides. Malheureusement sa production en Afrique Sub-Saharienne reste confrontée à de récurrents problèmes non seulement de baisse de fertilité des sols mais aussi de variabilité pluviométrique d'une année à une autre. La production pourrait bénéficier d'une gestion adaptée de la fertilisation des sols (apport d'engrais minéraux) en lien avec les informations et prévisions météorologiques. Pour être efficace, l'ajustement de la fumure minérale doit passer par un fractionnement des apports tout au long de la croissance de la culture permettant de les adapter aux besoins de la plante selon son stade de développement. S'il est combiné à des conditions optimales d'humidité, ce fractionnement améliore l'assimilation des nutriments et accroît donc les rendements et/ou la qualité des grains produits. Ainsi, pour notre étude, nous avons décidé de caractériser la réponse de quatre variétés de sorgho, adaptées à l'Afrique de l'Ouest, à différentes modalités de fertilisation. Après avoir caractérisé la réponse de ces quatre variétés à différentes fertilisations d'azote, nous allons confronter nos données expérimentales

au modèle DSSAT-CSM-CERES-Sorghum et explorer différentes combinaisons afin de pouvoir générer des conseils de fertilisation aux agriculteurs en relation aux informations météorologiques.

Chapitre 2 : Réponses agronomiques de 4 variétés de sorgho à différentes stratégies contrastées d'apports d'intrants (NPK et urée) sous différents régimes hydriques

Ce chapitre a fait l'objet de publications. Les articles publiés sont reproduits en annexe.

Article journal

Komla Kyky Ganyo, Bertrand Muller, Espoir Koudjo Gaglo, Aliou Guissé, Ndiaga Cissé et Myriam Adam, 2018. **Optimisation du NPK et urée basée sur les informations climatiques pour accroître la production du sorgho en zones soudano-sahéliennes du Sénégal.** Journal of Applied Biosciences 131: 13293 – 13307. <https://doi.org/10.4314/jab.v13i1.5>

Communication scientifique et acte

Komla Kyky Ganyo, Bertrand Muller, Aliou Guissé, et Myriam Adam, 2018. **Fertilization Strategies Based on Climate Information to Enhance Food Security Through Improved Dryland Cereals Production** in: Leal Filho W. (ed.), Handbook of Climate Change Resilience, Springer, Cham, https://doi.org/10.1007/978-3-319-71025-9_90-1.

Communications scientifiques orales

1- Komla Kyky Ganyo, Bertrand Muller, Aliou Guissé, Ndiaga Cissé et Myriam Adam, 2018. **The Advantage of Late Fertilization Strategies Based on climate informations to Enhance Sorghum Production in Soudano-Sahelian Conditions.** Sorghum in the 21th century, 9-12 April 2018, Cape Town, South Africa.

2- . Komla Kyky Ganyo, Bertrand Muller, Aliou Guissé, Ndiaga Cissé et Myriam Adam, 2017. **Optimizing Fertilization to Increase Sorghum Production in Sahel Conditions as a Function of Weather Forecasts.** Conférence internationale sur l'Intensification Durable (CID) LMI/LAPSE/IAVAO/ISRA, 24-26 Mai 2017 Dakar, Sénégal.

3- Komla Kyky Ganyo, Bertrand Muller, Aliou Guissé, Ndiaga Cissé et Myriam Adam, 2016. **Etudes et simulations des réponses de quatre variétés de sorgho à des stratégies contrastées d'apport d'intrants.** 1ere édition des doctoriales communes des écoles doctorales de l'UCAD et de la fête de la science, 29 Novembre-02 Décembre 2016, Dakar, Sénégal.

Draft article de journal

Komla Kyky Ganyo, Bertrand Muller, Espoir Koudjo Gaglo, Malick Ndiaye, Aliou Guissé, Ndiaga Cissé, Gerrit Hoogenboom, Myriam Adam. **Defining Fertilization Strategies for Sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) Production under Sudano-Sahelian Conditions: Options for Late Fertilizer Application.** En cours de soumission dans Field Crops Research

2.1 Résumé

La production de sorgho (*Sorghum bicolor* L. Moench) en Afrique Sub-Saharienne reste confrontée à de récurrents problèmes de carence en éléments nutritifs du sol et de variabilité des précipitations. Pour comprendre les facteurs environnementaux qui déterminent l'effet de l'application d'engrais sur le rendement du sorgho dans les conditions soudano-sahéliennes et pour définir des stratégies de fertilisation adaptées, des essais en split plot avec quatre répétitions ont été conduits en 2015 et 2016 à Nioro du Rip et à Sinthiou Malème au Sénégal sur sol sableux (limono-sableux en 2016 à Sinthiou Malème) sous différents régimes hydriques (pluvial et pluvial avec complément d'irrigation). Quatre variétés (Fadda, Faourou, Soumalembe et Soumba) à différentes durées de cycle ont été soumises à cinq modalités de fertilisation : T1 = pas d'engrais ; T2 = 150 kg/ha de NPK (15-15-15) apportés à la levée + 50 kg/ha d'urée (46%) au tallage + 50 kg/ha d'urée à la montaison (recommandation au Sénégal pour le sorgho) ; T3 = moitié dose de T2 appliquée aux mêmes stades ; T4 = 150 kg/ha de NPK + 50 kg/ha d'urée apportés à la montaison + 50 kg/ha d'urée à l'épiaison (T2 décalé) et T5 = moitié dose T4 apportée aux mêmes stades. Les résultats montrent que (1) dans la plupart des environnements, les plantes soumises à la fertilisation tardive, initialement stressées ont recouvert la croissance comme si les apports étaient faits tôt dans la saison; (2) T5 produit plus que T4 en conditions plus humides, (3) la fertilisation tardive est particulièrement bénéfique s'il y a plus de 400 mm de pluies de la date d'apport tardif à la maturité pour les variétés à cycle long (Soumalembe) sur les sols à faible teneur en N, beaucoup d'eau également (≥ 400 mm) pour les variétés caudatum de cycle court à moyen (Faourou et Soumba) avec la fertilisation tardive à forte dose quelles que soient les teneurs en N du sol et pour les hybrides (Fadda) s'il y a une quantité importante d'eau (≥ 600 mm) avec la fertilisation tardive à faible dose indépendamment des teneurs en N du sol, (4) la variété hybride comparée aux 3 autres ne répond pas mieux à la fertilisation en ce qui concerne les grains, (5) les variétés tardives (Soumalembe et Fadda) ont mieux bénéficié de l'apport tardif comparées aux variétés précoces.

Mots clés : NPK, urée, optimisation, sorgho, Sénégal, variabilité pluviométrique

2.2 Introduction

Le sorgho (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) est un des aliments de base de millions de personnes en Afrique (Gueye *et al.*, 2016). Cependant, l'agriculture en générale et la culture du sorgho en particulier en zones Soudano-Sahéliennes d'Afrique sont confrontées à un certain nombre de contraintes parmi lesquelles la faible fertilité des sols (Vanlauwe *et al.*, 2010) et la non-utilisation ou faible taux d'utilisation d'intrants agricoles (engrais, variétés améliorées) (Gerstenmier et Choho, 2015). A cela, s'ajoutent les variabilités inter et intra-annuelles de la pluviométrie (Hansen, 2002). En effet, le climat en Afrique est varié et variant. Il est varié parce qu'il va des régimes équatoriaux humides, tropicaux arides et à des climats subtropicaux de type méditerranéen, et variant parce que tous ces climats présentent des degrés de variabilité temporelle différents, en particulier en ce qui concerne les pluies (Hulme *et al.*, 2001). L'Afrique sub-saharienne est connue pour être particulièrement vulnérable aux aléas du climat en raison de la combinaison de niveaux naturellement élevés de variabilité climatique, de systèmes agricoles encore très dépendant de la pluviométrie et de capacités économiques limitées (Challinor *et al.*, 2007; Roudier *et al.*, 2011). Les variations du climat expliquent un tiers de la variabilité globale des productions de cultures (Ray *et al.*, 2015). Par ailleurs, le changement climatique ajoute du stress et de l'incertitude à la production agricole en Afrique, où de nombreuses régions, dont l'Afrique Sub-Saharienne, sont déjà vulnérables à la variabilité climatique. La production végétale dans ces régions devient de plus en plus risquée (Slingo *et al.*, 2005). Cependant, il y a un réel besoin d'augmenter la productivité des cultures du fait de l'explosion démographique et de la forte demande alimentaire qui s'en suit, et de minimiser les pertes sur les investissements.

Parmi les nombreuses options techniques possibles (la maîtrise d'eau, les associations culturales, la micro-fertilisation par exemple) à la maximisation ou optimisation des productions, l'utilisation des prévisions climatiques est prometteuse, et sans coûts pour l'agriculteur. Elle pourrait aider les agriculteurs africains à prendre des décisions stratégiques cruciales concernant le choix des variétés, des dates de semis et l'utilisation des engrais qui réduiraient leur vulnérabilité et augmenteraient leur rentabilité (Ingram *et al.*, 2002; Roudier *et al.*, 2011; Sultan *et al.*, 2010). Malgré l'évolution du climat, les recommandations de fertilisation en termes de dose et période d'application n'ont pas changé. Dans ce contexte, un management approprié de la fertilisation minérale en se basant sur les prévisions climatiques et/ou informations météorologiques pourrait permettre d'optimiser la productivité des intrants en maximisant leurs effets (rendements élevés) en cas de pluviométrie favorable, et en

diminuant leur usage, et perte, tout en essayant d'obtenir un minimum de rendement, en cas de pluviométrie défavorable. Pour cela, il faut mieux comprendre et maîtriser les interactions entre l'azote et l'eau dans la production des cultures. En particulier, retarder et/ou réduire l'apport d'engrais du fait d'un démarrage tardif des pluies pourrait être non seulement une stratégie appropriée afin d'accroître la production du sorgho, et donc de réduire l'insécurité alimentaire mais aussi de réduire les risques de perte d'investissements sur la production.

Les effets de la fertilisation tardive, en particulier d'apport tardif d'azote, sur les rendements et qualités protéiniques des grains de céréales, sont très variables (Abad *et al.*, 2004; Velasco *et al.*, 2012; Amiri *et al.*, 2014; Blandino *et al.*, 2015; Xue *et al.*, 2016). Cependant, des études au champs sur la fertilisation tardive ont montré des résultats prometteurs. Wuest et Cassman (1992) ont rapporté une augmentation significative du rendement du blé irrigué en comparant l'efficience de l'absorption de l'azote (N) apporté au semis contre un apport à la floraison. Perez *et al.* (1996), ont pour leur part rapporté une augmentation du rendement de riz blanc et riz paddy respectivement de 6% et 17% avec un apport additionnel de 30 kg/ha de N à la floraison. Etudiant le fractionnement de l'engrais azoté sur les performances du blé, Bodson *et al.* (2003) ont montré que l'application de N en deux temps, à la montaison et au stade feuille drapeau, donne des rendements similaires à la pratique traditionnelle avec trois apports, au tallage, à la montaison et au stade feuille drapeau. Cependant, les grains obtenus avec l'application en deux temps sont d'une qualité supérieure c'est-à-dire plus riche en protéine. Enfin, un certain nombre d'auteurs ont montré le potentiel d'accroître le rendement et les protéines des grains à travers l'application tardive de N à la fois en conditions pluviales (Hucklesby *et al.*, 1971; Spiertz et Ellen, 1978) et irriguées (Pushman et Bingham, 1976; Strong, 1982). Ces auteurs ont constaté que l'augmentation du rendement avec les apports tardifs dépendaient de l'apport de N dans le sol, de l'absorption de N initial du sol, du stade de développement des plantes et du potentiel de rendement.

Cette étude cherche à apporter des éléments de réponse pour aborder la question de la fertilisation tardive en ASS. Elle a donc pour objectifs (i) d'étudier les réponses de quatre variétés de sorgho de différents cycles à des apports tardifs et/ou réduits non conventionnels de NPK et d'urée, ce en relation à différents régimes hydriques (différentes conditions irriguées ou pluviales), c'est-à-dire de caractériser ces interactions Variétés*Eau*Fertilisation, et (ii) de définir les conditions favorisant un gain de rendement avec la fertilisation tardive. Nos hypothèses de départ sont (1) la fertilisation tardive sera particulièrement bénéfique en condition pluviale avec une bonne distribution des pluies après un démarrage lent de la saison

des pluies ; (2) la variété hybride va réagir mieux à la fertilisation que les autres ; et (3) les variétés à cycle long bénéficieront plus de la fertilisation tardive que les variétés à cycle court car un démarrage lent des pluies affectera plus celles-ci du fait de leur maturité précoce.

2.3 Matériel et méthodes

2.3.1 Sites expérimentaux

Six expérimentations ont été conduites durant les saisons culturales 2015 et 2016 dans les stations d'expérimentation de l'Institut Sénégalais de Recherches agricoles (ISRA) de Nioro du Rip (13°44' latitude Nord et 15°46' longitude Ouest) et Sinthiou Malème (13°46 latitude Nord et 13°40 longitude Ouest). Le climat sur les deux sites est de type Soudano-Sahélien caractérisé par un régime pluvieux mono modal allant de juin à octobre avec un pic à la dernière semaine d'Août. La moyenne pluviométrique sur la période de 1987 à 2016 est similaire pour les deux sites, 790 mm et 763 mm respectivement pour Nioro du Rip et Sinthiou Malème alors qu'elle a été très variable durant les expérimentations, 1045 mm en 2015 et 917 mm en 2016 à Nioro du rip et 563 mm en 2015 et 553 mm en 2016 à Sinthiou Malème. La température moyenne 1987 à 2016 est de 28°C à Nioro du Rip et 29°C à Sinthiou Malème.

Le sol à Nioro du Rip était de texture sableuse en 2015 et 2016 alors qu'il était sableux en 2015 et sablo-limoneux en 2016 à Sinthiou Malème. Le précédent cultural était l'arachide pour tous les essais. Les conditions initiales du sol ont été caractérisées avant chaque essai sur l'horizon 0 – 30 cm (Tableau 2.1). Les éléments fins (limon et argile) étaient relativement importants à Sinthiou Malème en 2016. Les sols étaient faiblement acides ($5 < \text{pH} < 7$), pauvres en phosphore ((Moyenne $\text{P}_{\text{Ass}/3} < 7 \text{ mg [P-Bray I]/kg}$ de sol, seuil critique en Afrique de l'Ouest) avec de faibles taux de carbone total. Les figures 2.1 et 2.2 illustrent respectivement les situations géographiques de Nioro de Rip et Sinthiou Malème et le climat (pluie, irrigation et température moyenne) au cours des expérimentations.

Tableau 2.1: Conditions du sol avant les expérimentations

Localité	Essais	Horizon (cm)	Argile (%)	Limon (%)	Sable (%)	pH	P total (ppm)	P Assim (ppm) ^a	C total (%) ^b	N total (%) ^c	MO (%)	C/N
Nioro du Rip	N15-P	0-10	1,45	3,43	95,12	5,78	19,88	8,686	0,636	0,052	1,10	12,19
		10-20	5,23	3,72	91,06	5,17	10,72	4,685	0,580	0,038	1,00	15,25
		20-30	4,49	2,82	92,69	5,68	12,05	5,264	0,615	0,065	1,06	9,41
	N15-I	0-10	1,92	3,46	94,62	6,09	15,54	6,791	0,748	0,042	1,29	17,62
		10-20	2,54	4,52	92,95	5,98	13,13	5,738	0,595	0,050	1,03	11,81
		20-30	3,95	2,84	93,21	5,94	15,78	6,896	0,636	0,049	1,10	13,07
	N16-I	0-10	1,94	3,78	94,28	6,00	10,35	4,520	0,508	0,047	0,88	11,31
		10-20	5,14	5,76	89,10	5,46	7,00	3,059	0,508	0,033	0,88	11,88
		20-30	8,31	4,90	86,79	5,54	6,29	2,748	0,457	0,046	0,79	9,85
	N16-I2	0-10	2,49	3,85	93,67	6,98	12,68	5,541	0,611	0,064	1,05	9,55
		10-20	5,16	3,73	91,11	7,01	11,97	5,231	0,536	0,046	0,92	11,76
		20-30	8,34	4,61	87,06	6,62	13,19	5,763	0,499	0,050	0,86	10,06
Sinthiou Malème	S15-P	0-10	2,71	4,21	93,08	5,69	6,79	2,968	0,411	0,040	0,71	10,36
		10-20	2,63	4,15	93,22	5,29	6,37	2,785	0,372	0,035	0,64	10,63
		20-30	2,94	3,46	93,60	5,51	5,75	2,511	0,359	0,037	0,62	9,62
	S16-P	0-10	7,21	8,43	84,36	6,16	8,01	3,502	0,676	0,060	1,17	11,27
		10-20	8,10	7,94	83,96	6,76	4,16	1,818	0,583	0,053	1,01	11,04
		20-30	11,34	8,52	80,14	6,45	5,48	2,394	0,592	0,033	1,02	18,06

^aOlsen et Dabin, ^bWalkley et Black, ^cKjeldahl, PAssim : Phosphore assimilable, C : carbone, N : Azote, MO : Matière organique, pH : Potentiel d'Hydrogène

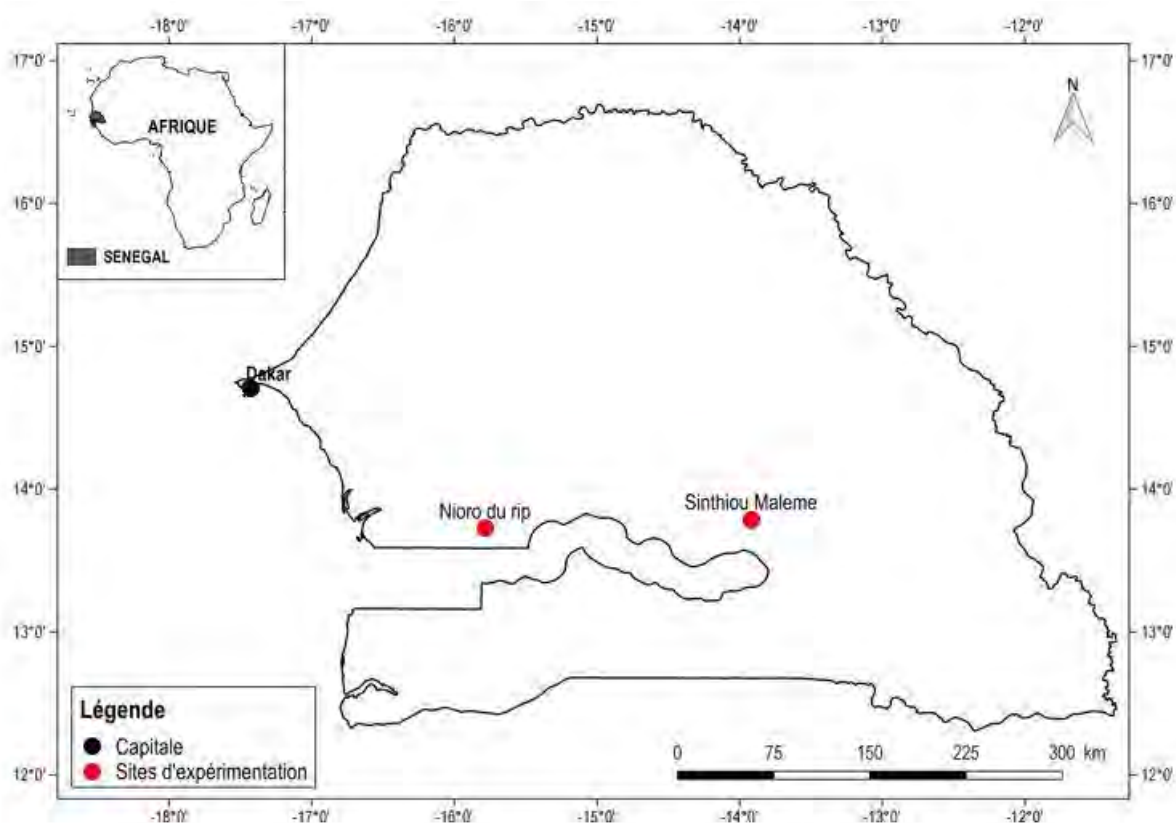


Figure 2.1: Situation géographique des sites d'essais

Source : Ganyo, 2018

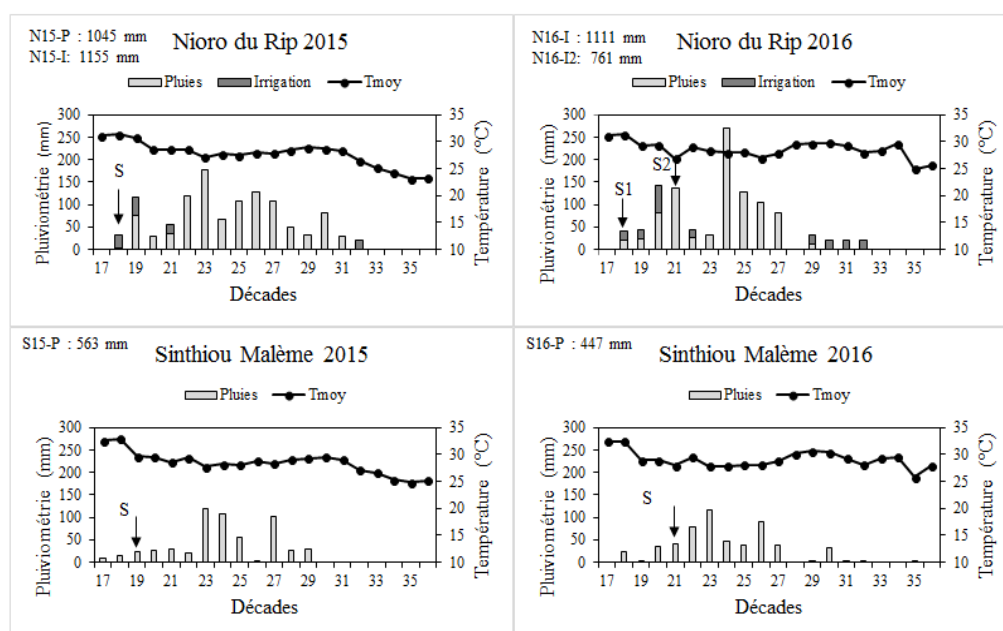


Figure 2.2 : Pluviométrie, irrigations et températures moyennes durant les expérimentations

2.3.2 Matériel végétal

Le tableau 2.2 montre les caractéristiques des quatre variétés de sorgho utilisées dans cette étude. Elles sont différentes en termes de phénologie (cycles court, moyen et long), d'architecture (petite et grande tailles), réponse à la fertilisation (variété hybride contre variétés améliorées) et utilisations (grain et double usage).

Tableau 2.2 : Caractéristiques des variétés de sorgho utilisées

Nom	Origine	Race	Durée du cycle	Sensibilité à la photopériode	Architecture	Usage
Fadda	Mali	Guinea-hybride	Moyen	Sensible	Grande	Double
Faourou	Sénégal	Caudatum	Court	Non-sensible	Petite	Grain
Soumalembe	Mali	Guinea	Long	Sensible	Grande	Grain
Soumba	Mali	Caudatum	Moyen	Légèrement sensible	Petite	Double

Durée du cycle : court : de 85 à 95 jours, Moyen : de 105 à 135 jours Long : > 135 jours

Architecture : grande : > 3 m, petite < 2 m. Usage : Double : Grain et biomasse.

2.3.3 Dispositifs expérimentaux et conduite d'essais

Le dispositif expérimental en 2015 et 2016 est un split plot en blocs complets randomisés avec quatre répétitions. Les traitements étaient constitués de cinq modalités de fertilisation minérale différant par les doses et/ou les périodes d'apport combinées à quatre variétés de sorgho. Les modalités de fertilisation étaient (i) « zéro » (T1, pas d'application d'engrais c'est-à-dire 0% correspondant aux pratiques paysannes courantes), (ii) 150 kg/ha de NPK (15-15-15) à la levée + 50 kg/ha d'urée (46%) au tallage + 50 kg/ha of urée à la montaison, (T2, c'est-à-dire la pratique conventionnelle recommandée au Sénégal pour le sorgho); (iii) 75 kg/ha de NPK (15-15-15) à la levée + 25 kg/ha d'urée (46%) au tallage + 25 kg/ha d'urée à la montaison (T3, moitié dose de T2 appliquée aux mêmes stades); (iv) 150 kg/ha de NPK + 50 kg/ha d'urée à la montaison + 50 kg/ha d'urée à l'épiaison (T4, soit les mêmes quantités que T2 mais apportées avec retard) ; et (v) 75 kg/ha de NPK + 25 kg/ha d'urée à la montaison + 25 kg/ha d'urée à l'épiaison (T5, moitiés des quantités de T4 apportées aux mêmes moments que T4). Les traitements de fertilisation étaient assignés en parcelles principales. Exceptée la modalité T2 qui est la pratique recommandée en termes de dose (apportant 69 kg/ha de N et 23 kg/ha de P et K) et périodes d'apport (levée, tallage et montaison) (MAE/DA, 2001), les autres modalités ont été déterminées en considérant des scénarii possibles d'usage et application de fertilisants découlant des prévisions climatiques et/ou pluviométries observées en début de campagne. Ainsi, des modalités de type T4 et T5 pourraient être pratiquées dans l'hypothèse (h1) où les

prévisions sont incertaines mais où finalement la saison démarre normalement et semble être bonne. Dans ce cas on n'apporte rien au départ, puis on fait des apports tardifs. Pour des raisons de logistique il n'y a pas eu de modalités testées correspondant à l'hypothèse contraire (h2) où la saison deviendrait catastrophique après un bon démarrage, ce qui conduirait les agriculteurs à ne pas appliquer de l'urée après avoir fait un apport initial de NPK. Cependant, on peut considérer que cette situation est globalement encadrée par les modalités T1 et T3.

Les variétés de sorgho (Fadda, Faourou, Soumalemba et Soumba) étaient assignées en parcelles élémentaires. Chaque parcelle élémentaire était constituée de cinq lignes de 6,8 m espacées de 0,8 m. L'écartement inter-poquets était de 0,4 m (Annexe 1 plan d'essai). Cinq à six graines étaient semées par poquet. Les plants ont été démariés à deux plants par poquet environ 15 jours après l'émergence, ce qui donnait une densité de 62 500 plants à l'hectare. Les engrais sont apportés à différents stades de développement déterminés par les changements morphologiques ou l'apparition d'un nouvel organe selon le cycle de développement de chaque variété (Figure 2.3). Pour les deux ans, les expérimentations ont été menées à différents endroits des stations afin d'éviter l'effet résiduel des engrais. A Nioro du Rip, les essais N15-I, N16-I et N16-I2 ont reçu un apport supplémentaire d'eau (tôt et tard dans la saison) par irrigation (aspersion) afin d'obtenir des conditions optimales de croissance (sans stress hydrique). Les essais irrigués ont reçu 110 mm en quatre irrigations en 2015, 200 mm en 10 apports pour N16-I et 95 mm en 5 apports pour N16-I2 en 2016. A Sinthiou Malème, il n'y avait pas d'équipement d'irrigation. Avant l'installation de chaque essai, un labour croisé de 20-25 cm de profondeur a été fait. Les opérations culturales (désherbage, contrôle des pestes/maladies et buttage) ont été conduites selon les recommandations de l'ISRA pour assurer des conditions optimales de développement. La figure 2.3 montre quelques parcelles d'expérimentation.



Figure 2.3: Photo des essais (A) avant fertilisation tardive et (B) après fertilisation tardive

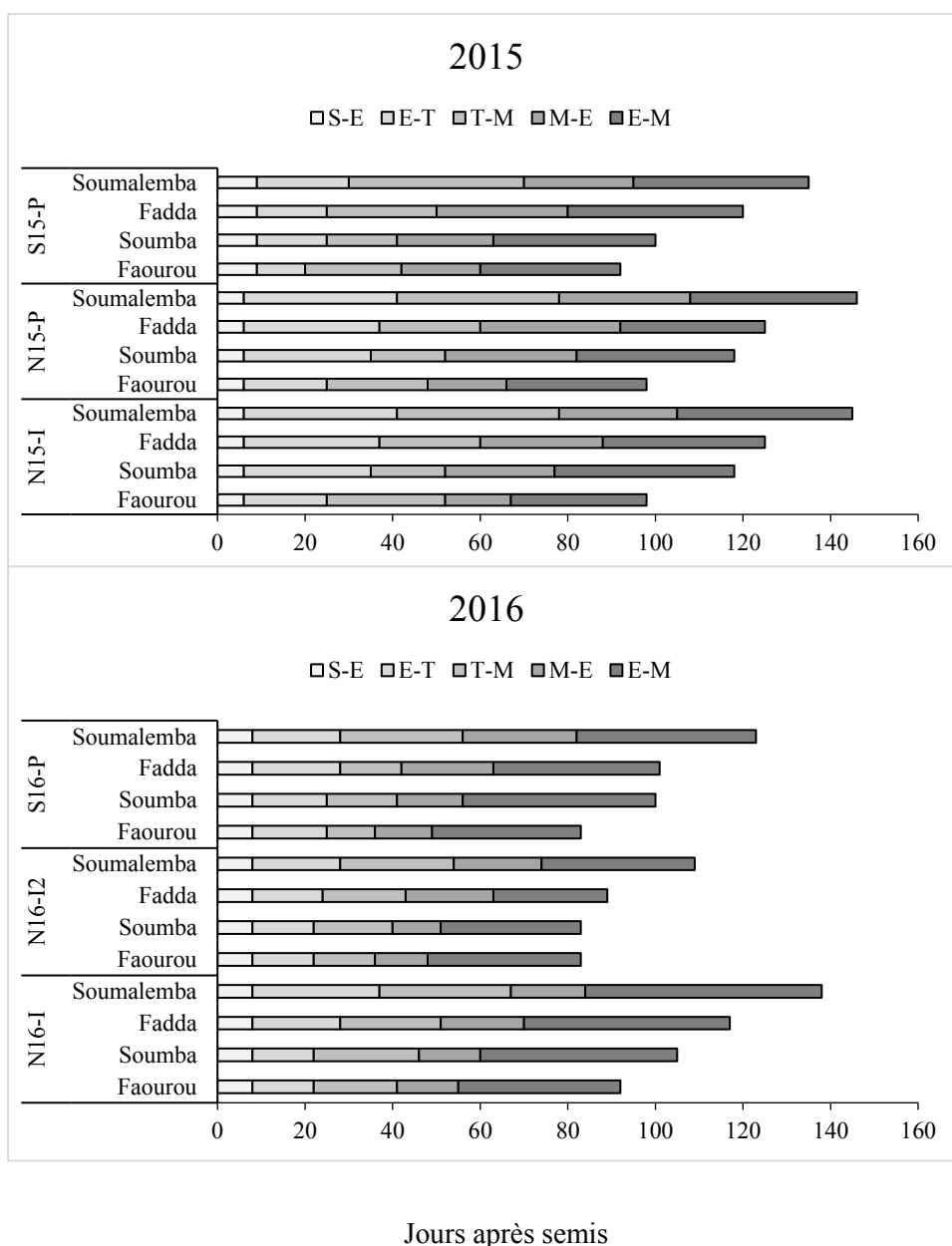


Figure 2.4: Stades de développement des différentes variétés de sorgho dans les différentes expérimentations

E-T : Emergence à Tallage, T-M : Tallage à Montaison, M-E : Montaison à Epiaison, E-M : Epiaison à Maturité, N15-I : Nioro du Rip 2015 irrigué, N15-P Nioro du Rip 2015 pluvial, N16-I Nioro du Rip 2016 irrigué date 1, N16-I2 : Nioro du Rip 2016 irrigué date 2, S15-P : Sinthiou Malème 2015 pluvial

Les expérimentations seront nommées et référencées comme suit “Nioro du Rip 2015 irrigué” (N15-I), “Nioro du Rip 2015 pluvial” (N15-P), “Nioro du Rip 2016 date de Semis 1” (N16-I), “Nioro du Rip 2016 date de Semis 2” (N16-I2), “Sinthiou Malème 2015” (S15-P) et “Sinthiou Malème 2016” (S16-P). La date de semis de N16-I2 a été avancée d’un mois par rapport à N16-I non seulement pour avoir différents régimes hydriques mais aussi pour la modélisation (calibration des variétés).

2.3.4 Collecte de données

L'indice de surface foliaire et la biomasse végétative (feuilles + tiges) ont été mesurés au cours du cycle de développement, au tallage (L1 et B1) et à la floraison (L2 et B2). A la récolte, la biomasse végétative finale et le rendement grain ont été évalués et l'indice de récolte (IR) calculé.

Paramètres de croissance : sur chaque parcelle élémentaire la biomasse végétative a été collectée au tallage (B1), toujours avant l'application tardive d'engrais et en pleine floraison (B2), toujours après l'application tardive sur deux placettes de 4 poquets sélectionnés aléatoirement sur les trois lignes centrales afin d'éviter les effets de bordure. La matière sèche a été évaluée après un processus de séchage sous serre et puis à l'étuve à 65 °C jusqu'à l'obtention de poids constant. L'indice de surface foliaire (LAI, i.e. leaf area index) a été mesuré avant la collecte de biomasse sur les mêmes placettes en utilisant un appareil SunScan (Delta-T) équipé d'un capteur annexe BF5 (Delta-T). Ces données ont été mesurées sur tous les essais à l'exception de B1 et L1 sur N16-I2 en raison d'un mauvais développement.

Rendement grain et biomasse finale : à maturité, douze poquets des trois lignes centrales ont été récoltés afin d'évaluer le rendement grain (Y) et la biomasse végétative finale (YB) après le même processus de séchage. L'indice de récolte (IR_{ij} , équation 2.1) a été alors calculé suivant l'équation :

$$(2.1) \quad IR_{ij} = Y_{ij} / (YB_{ij} + Y_{ij})$$

Où Y_{ij} est le rendement grain et YB_{ij} , la biomasse végétative finale du $i^{\text{ème}}$ traitement de fertilisation de la $j^{\text{ème}}$ variété.

D'autres indices appelés « Gain de rendement » ($G1_{ij}$, équation 2.2 ; $G2_{4j}$, équation 2.3 et $G3_{5j}$, équation 3.4) ont été calculés pour évaluer l'effet des traitements à apports tardifs (T4 et T5) comparés aux autres (T1, T2 et T3) :

$$(2.2) \quad G1_{ij} = (Y_{ij} - Y_{1j}) / Y_{1j}$$

$$(2.3) \quad G2_{4j} = (Y_{4j} - Y_{2j}) / Y_{2j} \text{ et}$$

$$(2.4) \quad G3_{5j} = (Y_{5j} - Y_{3j}) / Y_{3j}$$

où Y_{ij} se réfère au rendement grain du $i^{\text{ème}}$ traitement de fertilisation de la $j^{\text{ème}}$ variété (ici $i =$ T4 ou T5), Y_{1j} est le rendement grain de la variété j sous traitement T1 (contrôle avec non

application d'engrais correspondant aux pratiques paysannes) ; Y_{2j} étant le rendement grain sous T2 de la variété j (recommandation en termes de dose et période d'application), Y_{3j} , Y_{4j} et Y_{5j} étant les rendements en grains respectivement sous T3, T4 et T5 de la variété j.

2.3.5 Analyses des données

Les analyses statistiques ont été réalisées avec le logiciel R version 3.4.0 (<http://www.R-project.org/>; R Core Team, 2017). Afin de tester les réponses des quatre variétés de sorgho à l'apport de NPK et urée sous différentes conditions environnementales, les essais conduits en parcelles divisées (split plot) sur les deux ans ont été combinés pour chaque variable. La normalité des données a été vérifiée à l'aide du test de Shapiro-Wilk et l'homogénéité de la variance a été vérifiée à l'aide du test de Bartlett au seuil de probabilité de 5%. Les données ont été ensuite soumises à l'analyse de variance (ANOVA) en utilisant le dispositif arrangement des essais en split plot en blocs complets randomisés avec combinaison d'années et localités de McIntosh (1983). Les moyennes des traitements ont été discriminées en utilisant le test de la Plus Petite Différence Significative (PPDS ou LSD en anglais) lorsque l'ANOVA révèle une différence significative au seuil de 5%.

Par ailleurs, pour caractériser les conditions expérimentales, deux indicateurs ont été définis à savoir (i) la quantité d'eau (pluie et irrigations) reçue depuis l'application tardive (c'est-à-dire à partir de la montaison) jusqu'à 25 jours après floraison (25 jours après floraison correspondant à la période de remplissage des grains) (WLAf25) et (ii) la quantité d'azote dans le sol avant les essais (N_{total} , cf. tableau 2.1).

2.4 Résultats

2.4.1 Les conditions expérimentales

La figure 2.2 montre les cumuls d'eau et les températures moyennes enregistrés à Nioro du Rip et Sinthiou Malème durant les deux saisons de culture. Les températures moyennes étaient légèrement plus élevées en 2016 qu'en 2015 et légèrement plus élevées à Sinthiou Malème qu'à Nioro du Rip indépendamment des années. Elles diminuent du semis à la 27^{ème} décade puis augmentent légèrement jusqu'à la décade 30 (fin de remplissage des grains de Faourou et Soumba et début remplissage Fadda et Soumalemba), avant de décroître à nouveau. N15-I a été l'essai le plus arrosé (1155 mm) c'est-à-dire ayant eu les conditions les plus humides, suivi de N16-I (1111 mm), N15-P (1045 mm), N16-I2 (761 mm), S15-P (563 mm) et de S16-P (447 mm) (Figure 2.2). Les quantités d'eau reçues de l'apport tardif à 25 jours après floraison

(WLAf25) ont varié à la fois selon les environnements (distribution d'eau) et le cycle des variétés (Tableau 2.3).

Les conditions expérimentales ont aussi différé en termes de teneur d'azote (N) contenu dans les 30 premiers centimètres du sol. Le N du sol a varié de 167 à 235 kg/ha, ce qui nous a conduit à considérer deux classes de sol, à savoir les environnements à $N < 200$ kg/ha ($160 \leq N < 200$ kg/ha, c'est-à-dire à N faible) et les environnements à $N > 200$ kg/ha ($200 \leq N < 240$, c'est-à-dire à N élevé) (Tableau 2.3).

Tableau 2.3: Indicateurs caractérisant les six environnements

Environnement	Plage de WLAf25 selon les variétés (mm)	N sol (kg/ha 0-30 cm)	Appréciation
N15-P	307 – 488	231	N élevé
N15-I	327 – 600	209	N élevé
N16-I	648 – 726	186	N faible
N16-I2	360 – 600	235	N élevé
S15-P	431 ^a	167	N faible
S16-P	181 - 241	228	N élevé

^a même valeur pour les 4 variétés

2.4.2 Analyse des interactions V*E*F

Tous les facteurs simples (Variété, Environnement, Fertilisation) ont montré un effet significatif sur toutes les variables au seuil de 5%, excepté l'effet de la fertilisation sur l'indice de récolte (IR, Tableau 2.4). L'interaction E*F (c'est-à-dire Environnement*Fertilisation) a eu un effet significatif sur le rendement grain, les différentes biomasses mesurées et l'indice de surface foliaire après l'application tardive d'engrais (L2) alors que l'interaction V*E (c'est-à-dire Variété*Environnement) a montré un effet significatif sur toutes les variables. L'interaction V*F n'a eu d'effet significatif que sur les mesures de biomasse (B1, B2 et YB). La triple interaction V*E*F a affecté significativement le rendement grain uniquement (Tableau 2.4).

Tableau 2.4 : Analyse statistique des effets des facteurs variété, environnement et fertilisation, et de leurs interactions, sur les rendements, les biomasses s et les indices de récolte

Source	Grain (kg/ha)	Biomasse (kg/ha)			LAI		IR
		B1	B2	YB	L1	L2	
Variété (V)							
Fadda	1097 a	95 b	7897 a	5855 b	0,36 b	2,26 a	0,17 c
Soumalemba	1038 a	158 a	7797 a	6873 a	0,42 a	2,21 a	0,13 d
Soumba	901 b	76 a	5311 b	3347 c	0,33 c	1,94 c	0,21 b
Faourou	1031 a	91 bc	3925 c	2385 d	0,35 bc	1,55 d	0,29 a
Environnement (E)							
N15-I	1170 b	68 d	6387 b	5046 b	0.36 b	2.34 b	0,21 bc
N16-I	837 c	118 b	5893 bc	4597 bc	0.42 a	1.71 c	0,16 d
N15-P	915 c	96 c	5361 c	5044 b	0.36 b	2.36 ab	0,18 cd
N16-I2	604 d	-	3728 d	2658 d	-	1.43 d	0,18 cd
S15-P	929 c	15 e	6315 bc	4289 c	0.26 c	1.12 e	0,24 a
S16-P	1617 a	160 a	9422 a	6072 a	0.44 a	2.52 a	0,23 ab
Fertilisation (F)							
T1	753 c	79 b	5061 d	3371 c	0,34 bc	1,70 b	0,20
T2	1297 a	151 a	7992 a	5781 a	0,40 a	2,14 a	0,20
T3	1085 b	136 a	6069 bc	4895 b	0,41 a	2,05 a	0,20
T4	1102 b	89 b	6512 b	5270 ab	0,36 b	2,12 a	0,21
T5	842 c	71 b	5395 cd	3811 c	0,32 c	1,81 b	0,20
Significativité							
V	*	***	***	***	***	***	***
E	***	***	***	***	***	***	***
F	***	***	***	***	***	***	ns
E*F	**	**	*	***	ns	**	ns
V*E	***	***	***	***	***	***	***
V*F	ns	*	*	**	ns	ns	ns
V*E*F	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns

--Mesure non faite ; Parmi les variétés, environnements et fertilisation les moyennes suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes à $P < 0.05$.

B1: Biomasse avant application tardive d'engrais (au tallage), B2: Biomasse après application tardive (pleine floraison); YB: Biomasse finale (récolte), LAI: Indice de surface foliaire (Leaf Area Index), L1: Indice de surface foliaire avant l'application tardive, L2: Indice de surface foliaire après l'application tardive, HI: Indice de récolte (Harvest Index). N15-I : Nioro Irrigué, N15-P : Nioro pluvial, N16-I : Nioro du Rip 2016 Semis 1, N16-I2 : Nioro du Rip 2016 Semis 2, S15-P : Sinthiou Malème 2015, S16-P : Sinthiou Malème 2016. T1 = pas d'apport d'engrais ; T2 = 150 kg/ha de NPK (15-15-15) à l'émergence + 50 kg/ha d'urée (46%) au tallage + 50 kg/ha de urea at stem extension ; T3 = 75 kg/ha de NPK (15-15-15) à l'émergence + 25 kg/ha d'urée (46%) au tallage + 25 kg/ha d'urée à la montaison ; T4 = 150 kg/ha de NPK + 50 kg/ha d'urée à la montaison + 50 kg/ha d'urée à l'épiaison ; T5 = 75 kg/ha de NPK (15-15-15) + 25 kg/ha d'urée (46%) à la montaison + 25 kg/ha d'urée à l'épiaison. E*F : interaction entre Environnement et Fertilisation, V*E : interaction entre Variétés et Environnement ; V*F : interaction entre Variétés et Fertilisation ; V*E*F : interaction entre Variétés, Environnement et Fertilisation

* Significatif à 5 %

** Significatif à 1%

*** Significatif à 0,1%

2.4.3 Effets de la fertilisation tardive sur le rendement en grains

Les rendements grains ont fortement différé selon les interactions **E*F** (Figure 2.5). Le traitement de référence recommandé T2 a donné les meilleures performances. Des rendements similaires ont été obtenus pour T3 (50% de T2 apports aux mêmes stades) et T4 (100% T2 mais apports tardifs) excepté dans l'environnement N15-I (Figure 2.5). Les plus faibles rendements grains (significativement différents de T2, T3 et T4) ont été observés en T5 (doses identiques à T3 mais en apports tardifs) et T1 (pas d'apport d'engrais) (Tableau 2.4 et Figure 2.5). De plus les « traitements tardifs » T4 et T5 ont montré des performances meilleures que celles obtenues en T1 indépendamment des environnements à l'exception de N15-P et N16-I2 (Figure 2.5).

S16-P et N16-I2 ont été respectivement l'environnement le plus et le moins performant quels que soient les traitements. Pour les autres environnements, il est observé certaines interactions, les quatre autres sites ayant répondu différemment à la fertilisation. N16-I a donné la meilleure réponse à T4 (100% tardif) comparé aux trois autres environnements. Le rendement grain a été meilleur avec T5 (demi-dose apportée tardivement) en condition plus humide (N15-I) comparé aux trois autres environnements. L'apport tardif de 100% d'engrais (T4) performait mieux que l'apport de 100% d'engrais tel recommandé (T2) sur les sites à faible potentiel (environnements N16-I et N16-I2, Figure 2.5)

En plus de l'interaction **E*F**, l'ANOVA a montré un effet significatif de l'interaction **V*E*F**, indiquant l'importance de tenir compte des variétés dans l'analyse des conditions permettant de tirer profit de la fertilisation tardive. Il est à remarquer que lorsque les rendements en T2 sont en deçà de 888 kg/ha (moyenne nationale de sorgho de 2012 à 2016 au Sénégal, (ANSD, 2016)), les rendements obtenus en T4 étaient plus élevés que ceux de T2 pour toutes les variétés excepté Fadda dans N16-I, Soumalemba dans N15-P et Soumba dans N16-I2 (Figure 2.6). Ce résultat confirme la bonne performance de T4 dans les environnements à faible potentiel

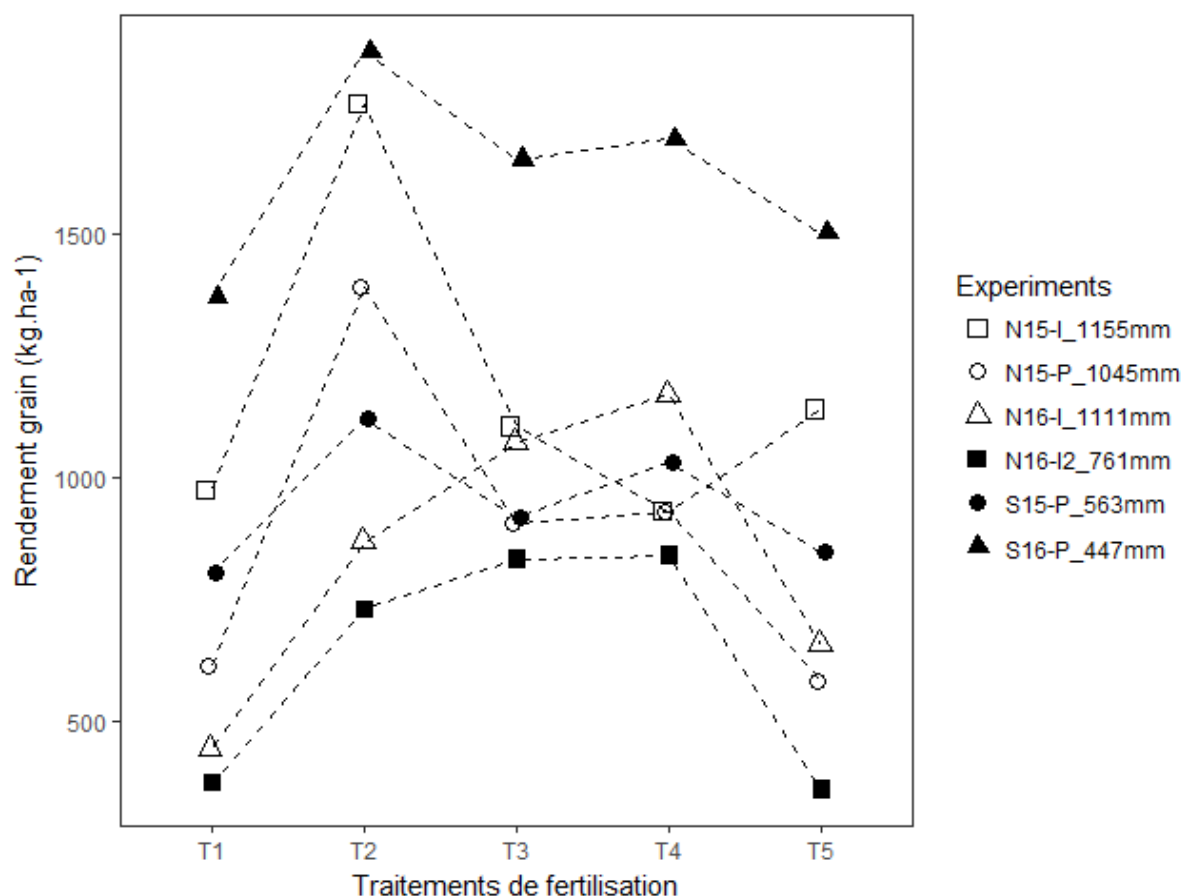


Figure 2.5 : Rendements moyens en grains en fonction des sites et des traitements de fertilisation

N15-I_1155 : Nioro 2015 Irrigué avec 1155 mm d'eau, N15-P_1045 : Nioro 2015 Pluvial avec 1045 mm d'eau, N16-I_1111 : Nioro 2016 Semis 1 avec 1111 mm d'eau, N16-I2_761 : Nioro 2016 Semis 2 avec 761 mm d'eau, S15-P_563 : Sinthiou Malème 2015 avec 563 mm d'eau, S16-P_447 : Sinthiou Malème 2016 avec 447 mm d'eau. T1 = pas d'apport d'engrais ; T2 = 150 kg/ha de NPK (15-15-15) à l'émergence + 50 kg/ha d'urée (46%) au tallage + 50 kg/ha de urea at stem extension ; T3 = 75 kg/ha de NPK (15-15-15) à l'émergence + 25 kg/ha d'urée (46%) au tallage + 25 kg/ha d'urée à la montaison ; T4 = 150 kg/ha de NPK + 50 kg/ha d'urée à la montaison + 50 kg/ha d'urée à l'épiaison ; T5 = 75 kg/ha de NPK (15-15-15) + 25 kg/ha d'urée (46%) à la montaison + 25 kg/ha d'urée à l'épiaison

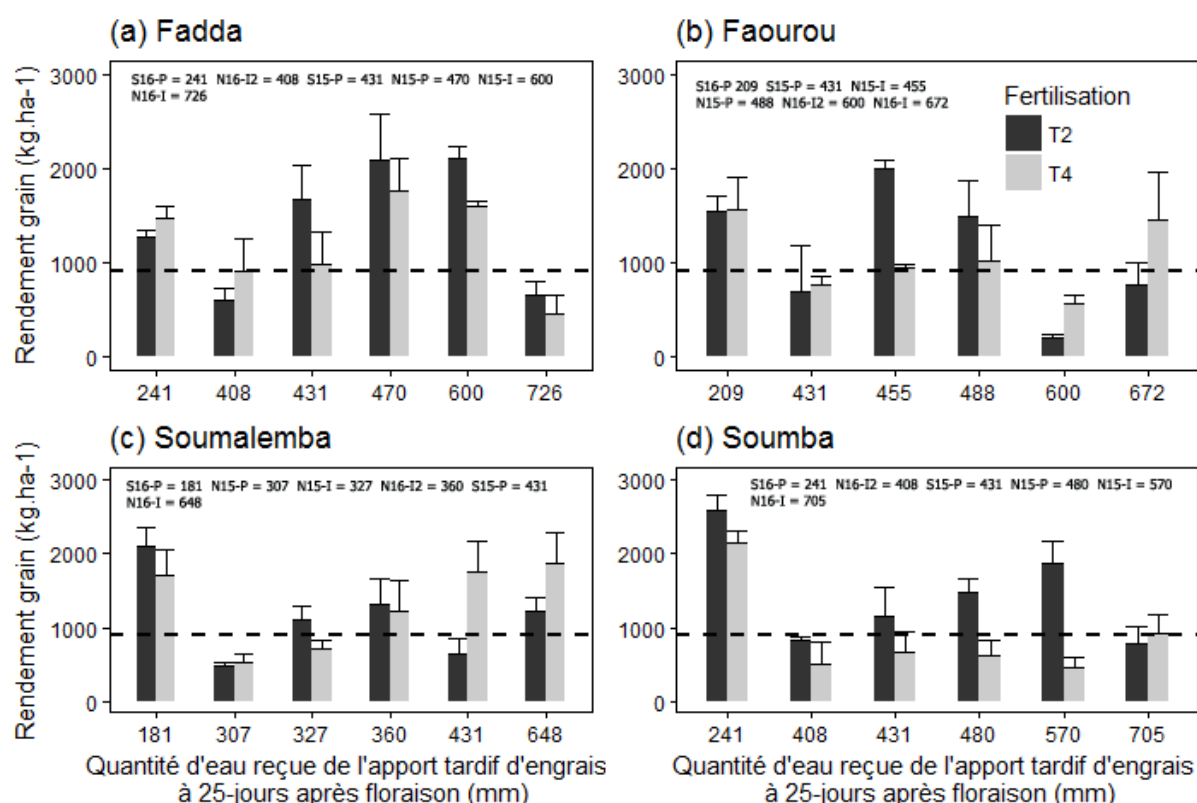


Figure 2.6: Comparaison de rendements grains des quatre variétés sous traitement recommandé (T2) et traitement retardé (T4) en fonction des quantités d'eau reçues après application tardive

T2 = 150 kg/ha de NPK (15-15-15) à l'émergence + 50 kg/ha d'urée (46%) au tallage + 50 kg/ha de urea at stem extension ; T4 = 150 kg/ha de NPK + 50 kg/ha d'urée à la montaison + 50 kg/ha d'urée à l'épiaison

Le meilleur rendement grain a été obtenu avec T2 pour Soumba dans presque tous les environnements alors que cela n'a pas été le cas pour les autres variétés : pour Soumalembe, il a été obtenu avec T2 en N16-I2 et S16-P seulement, avec T4 en N15-P, N16-I et S15-P et avec T5 en N15-I ; pour Faourou avec T2 en N15-I et N15-P, avec T3 en N16-I, et avec T4 en S15-P, S16-P et N16-I2 ; pour Fadda avec T2 en S15-P, N15-I et N15-P, avec T3 en S16-P et N16-I2, et avec T5 en N16-I (données non présentées). Les indices de gains de rendement sont présentés sur la figure 2.7 en relation avec les conditions environnementales (conditions hydriques caractérisées par les indicateurs WLAF25 et conditions de fertilité, c'est-à-dire les quantités de N dans le sol). Ces résultats confirment globalement la possibilité d'un gain avec un apport tardif par rapport à T1 (pratique paysanne courante), ce indépendamment des environnements (Figure 2.7a et 2.7b). Si l'on compare T4 (dose recommandée mais apports retardés) à la pratique normale recommandée, T2 (Figure 2.7c), il n'y a pas d'avantage pour Soumalembe et Soumba sur les sols à N élevé quelle que soit la quantité d'eau reçue entre l'apport tardif et la fin du remplissage des grains (WLAF25), alors que pour Faourou, il y a eu

un gain lorsque WLAf25 était au-dessus 600 mm quel que soit le type de sol, et que pour Fadda des gains ont été obtenus sur les sols à N élevé avec un WLAf25 en deçà de 400 mm (Figure 2.7c). Si l'on compare les modalités « demi-doses » T5 (apports retardés) et T3 (dates normales) (T5 vs. T3, Figure 2.7d) il y n'a pas eu d'avantages avec T5 pour les variétés à maturité précoce (Faourou et Soumba), excepté pour Faourou, lorsqu'il reçoit moins d'eau (WLAf25 < 400 mm) après la fertilisation tardive. Fadda a répondu mieux à la fertilisation tardive, avec WLAf25 au-dessus de 600 mm indépendamment de N contenu dans le sol. Faourou et Soumalemba ont donné plus de grains avec T5 comparé à T3 lorsque WLAf25 était inférieur à 400 mm sur les sols à N élevé et lorsque WLAf25 était compris entre 400 et 500 sur les sols à N faible (Figure 2.7d). Il est donc observé un effet bénéfique de la fertilisation tardive sous certaines conditions sur le rendement en grains.

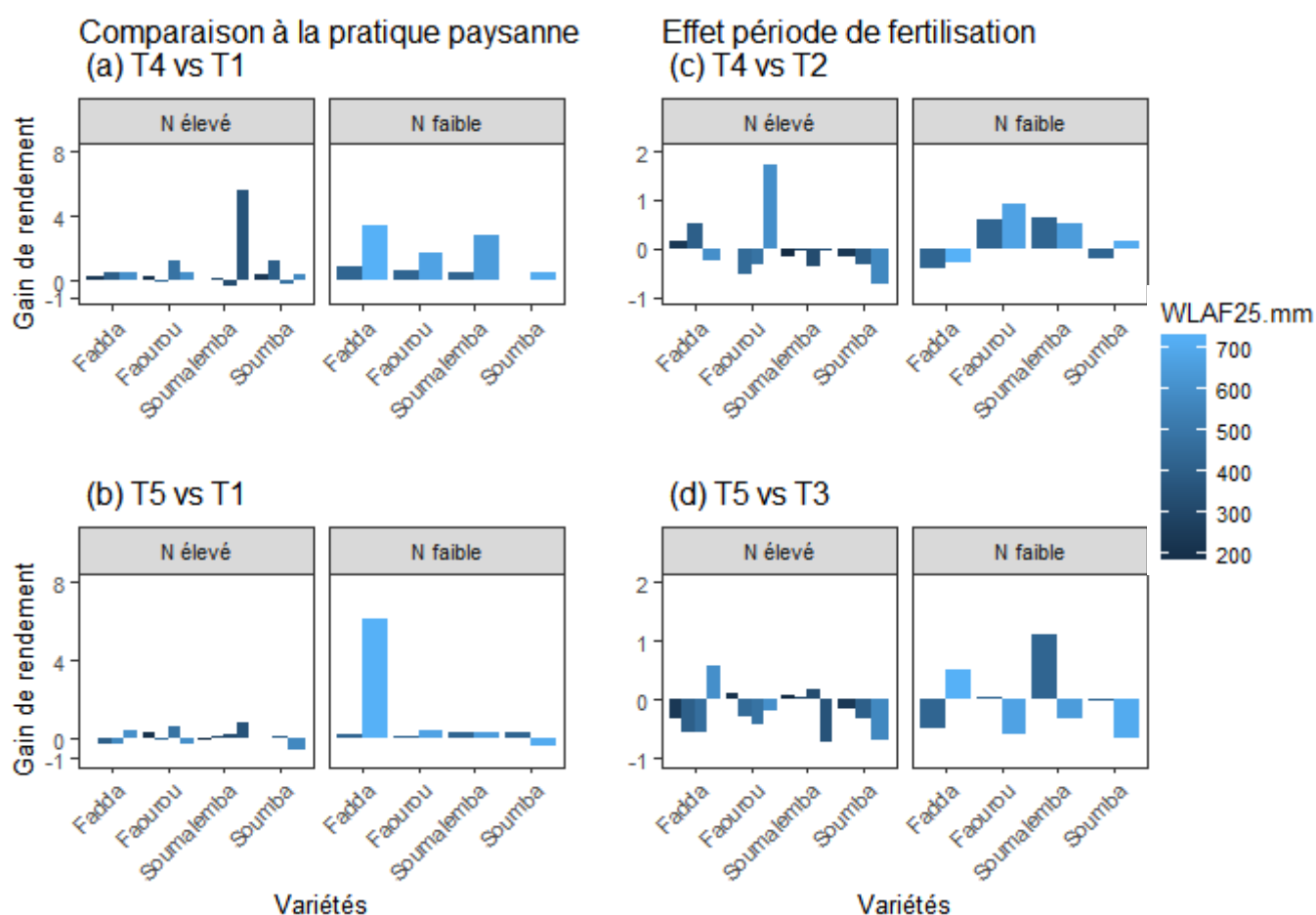


Figure 2.7: Gains et pertes de rendements liés aux fertilisations tardives (T4 et T5) en fonction des variétés et conditions environnementales (WLAf25, N)

WLAf25: Eau reçue du premier apport de la fertilisation tardive à 25 jours après floraison en millimètre (Water recorded from first Late fertilizer Application to 25 days after Flowering).

2.4.4 Effets de la fertilisation tardive sur le développement des biomasses

La figure 2.8 montre les interactions **E*F** sur la biomasse végétative à chacune des dates de prélèvements. Au moment du premier apport de la fertilisation tardive (faite à la montaison), les plants étaient en retard de croissance sous les traitements T4 comparativement à T2 (faibles biomasses B1 ; Figure 2.8a) dans trois situations sur 5 (N15-I, N15-P et S16-P) et en retard de croissance aussi sous T5 comparativement à T3 dans 4 situations sur 5 (N15-I, N15-P, N16-I et S16-P). Par ailleurs, les valeurs B1 observées sous T4 et T5 sont globalement du même ordre que celles observées sous T1. Ces retards de croissance ne peuvent s'expliquer a priori que par une moindre nutrition minérale liée à l'absence d'apport à la levée sous T4 et T5. Les biomasses étaient très faibles en S15-P pour toutes les modalités de fertilisation. Le maximum de la biomasse B1 a été obtenu pour T4 en N16-I (135 kg/ha) alors que le maximum pour T5 (113 kg/ha) a été obtenu en S16-P (Figure 2.7a). Selon les données de biomasses B2 (Figure 2.8b), après l'apport tardif d'engrais, les plants sous traitement T4 étaient encore en retard de croissance dans trois expérimentations sur six (N15-I, N16-I2 et S16-P), mais sous T5 on n'observait un retard de croissance par rapport à T3 que dans l'expérimentation N16-I2. Pendant ce temps, contrairement à B1, l'indice de surface foliaire L1 n'était pas affecté par l'interaction **E*F** avant la fertilisation tardive. Cependant, cette interaction a exercé un effet significatif sur la canopée des plantes (L2) après la fertilisation tardive. (Tableau 2.4)

La biomasse à la récolte (YB) a été aussi affectée par l'interaction **E*F** (Figure 2.8c). On note aussi que les biomasses à récolte sont logiquement inférieures à celles observées à floraison (B2), ce à cause de la senescence des feuilles. Les biomasses à la récolte (YB) sous T4 ne sont inférieures à celles sous T2 que pour une seule situation (N15-I) et celles sous T5 sont inférieures à celles sous T3 dans 3 situations (N16-I, N16-I2 et N15-P) (Figure 2.8c).

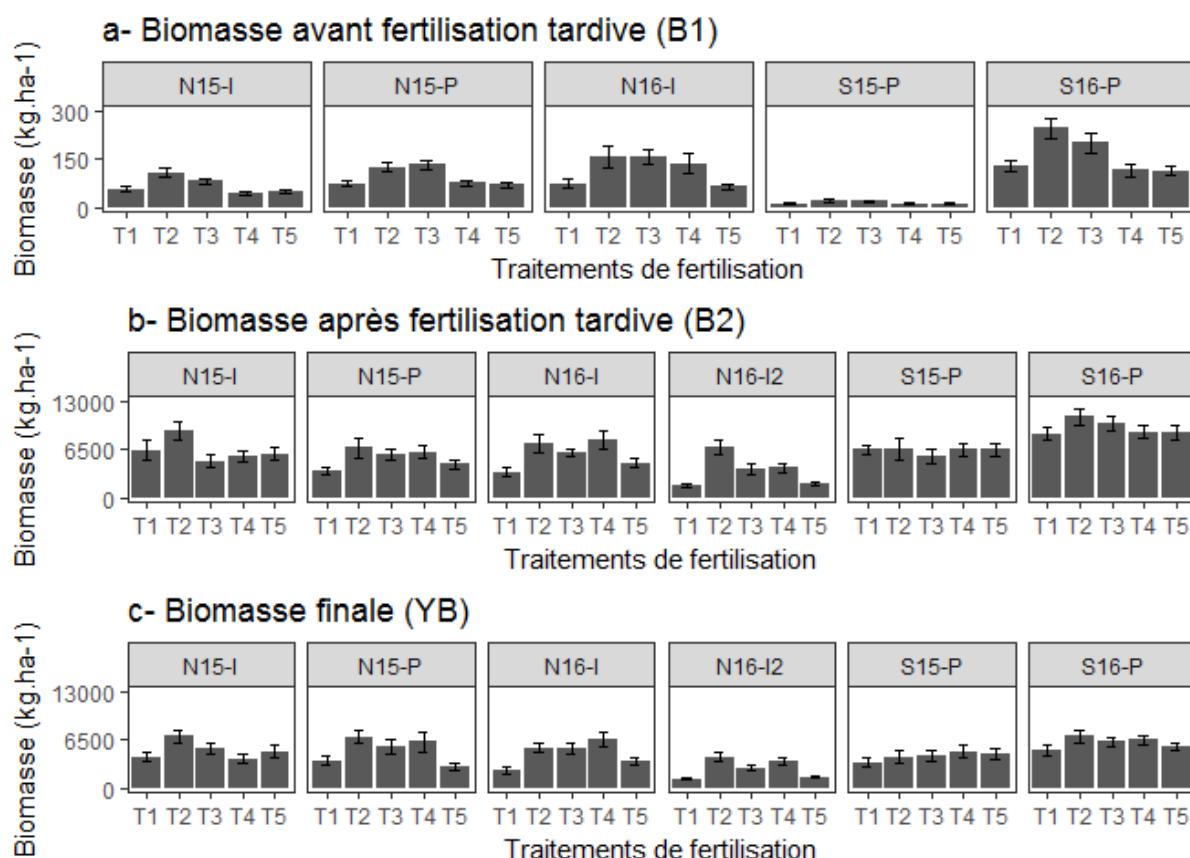


Figure 2.8: Dynamiques des biomasses végétales en fonction des traitements dans les différents environnements

N15-I : Nioro 2015 Irrigué, N15-P : Nioro 2015 Pluvial, N16-I : Nioro 2016 Semis 1, N16-I2 : Nioro 2016 Semis 2, S15-P : Sinthiou Malème 2015, S16-P : Sinthiou Malème 2016. T1 = pas d'apport d'engrais ; T2 = 150 kg/ha de NPK (15-15-15) à l'émergence + 50 kg/ha d'urée (46%) au tallage + 50 kg/ha de urée at stem extension ; T3 = 75 kg/ha de NPK (15-15-15) à l'émergence + 25 kg/ha d'urée (46%) au tallage + 25 kg/ha d'urée à la montaison ; T4 = 150 kg/ha de NPK (15-15-15) à la montaison + 50 kg/ha d'urée à l'épiaison ; T5 = 75 kg/ha de NPK (15-15-15) + 25 kg/ha d'urée (46%) à la montaison + 25 kg/ha d'urée à l'épiaison

Les valeurs de biomasse finale (YB) sont également affectées par l'interaction $V \times E$. Les YB maxima ont été obtenus pour Faourou (3427 kg/ha), Soumalembe (9178 kg/ha) et Soumba (4961 kg/ha) dans S16-P alors que pour Fadda (7485 kg/ha) cela a été dans N15-P. Le minimum a été enregistré dans N16-I2 pour Fadda (3253 kg/ha), Soumalembe (3542 kg/ha) et Soumba (2057 kg/ha) alors que pour Faourou (1589 kg/ha), il a été enregistré dans S15-P (données non présentées). YB a également été affecté par l'interaction $V \times F$ (Figure 2.9). La biomasse maximale a été produite sous T2 avec Soumalembe et la minimale sous T1 avec Faourou. Faourou a de façon générale été la variété la moins productive en biomasse suivie de Soumba, alors que Soumalembe a donné les valeurs de biomasse statistiquement plus élevées sous presque tous les traitements (sous T1, T2, T3 et T5). Les principales interactions ont concerné Fadda et Soumalembe par rapport à leur plus forte production de biomasse en T4 (Figure 2.9).

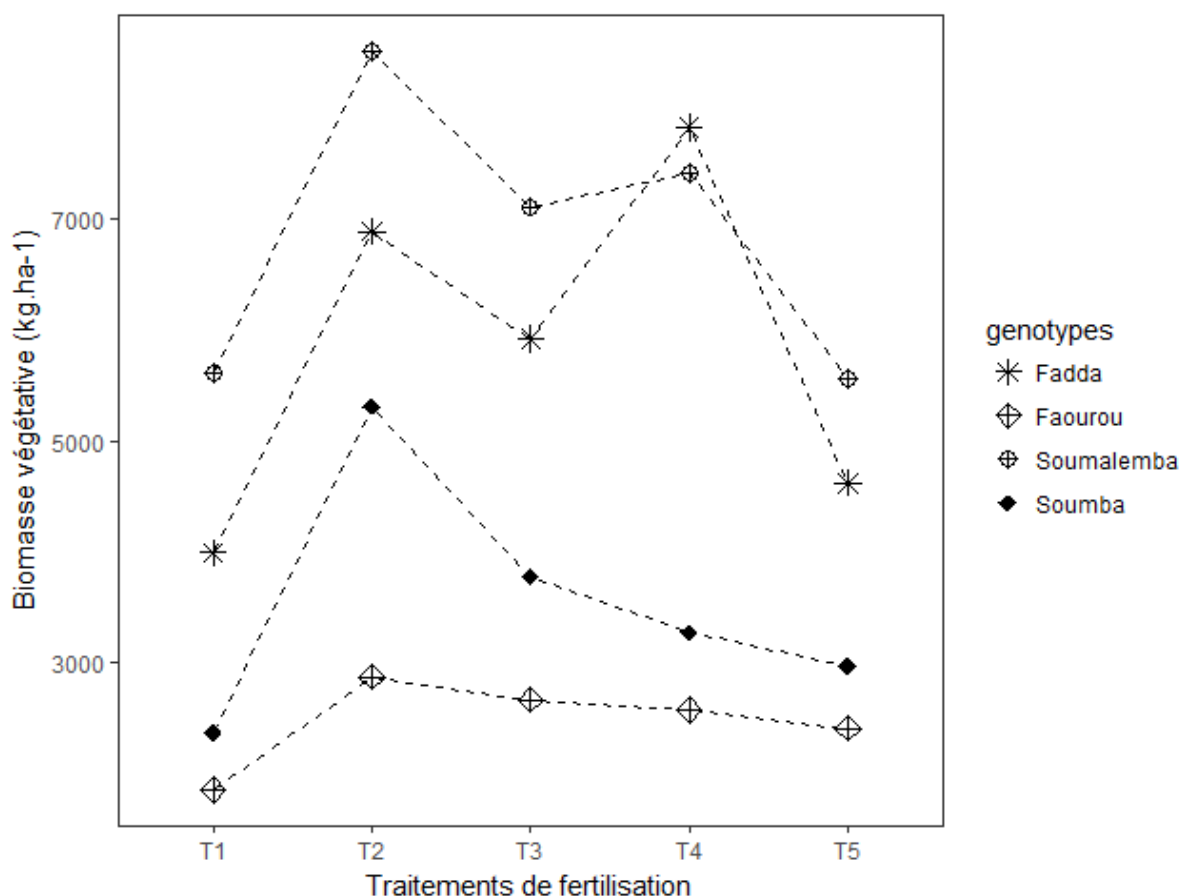


Figure 2.9: Biomasses végétales moyennes à la récolte selon les variétés et les traitements de fertilisation

T1 = pas d'apport d'engrais ; T2 = 150 kg/ha de NPK (15-15-15) à l'émergence + 50 kg/ha d'urée (46%) au tallage + 50 kg/ha de urea at stem extension ; T3 = 75 kg/ha de NPK (15-15-15) à l'émergence + 25 kg/ha d'urée (46%) au tallage + 25 kg/ha d'urée à la montaison ; T4 = 150 kg/ha de NPK + 50 kg/ha d'urée à la montaison + 50 kg/ha d'urée à l'épiaison ; T5 = 75 kg/ha de NPK (15-15-15) + 25 kg/ha d'urée (46%) à la montaison + 25 kg/ha d'urée à l'épiaison

2.5 Discussion

Dans cette étude, les effets sur 4 variétés contrastées de sorgho de différentes modalités d'apports fractionnés d'engrais, conventionnelles et tardives, ont été évalués dans différentes conditions environnementales en 2015 et 2016 à Nioro du Rip et à Sinthiou Malème au Sénégal.

2.5.1 Principales conclusions

Les rendements grains ont fortement varié et les résultats ont montré que les rendements grains ont été significativement affectés par l'interaction environnement-fertilisation. En effet, le rendement grain avec T4 (100% d'engrais apportés tard dans la saison) était supérieur à celui de T2 (100% d'engrais apporté tôt dans la saison) lorsque le potentiel des sites pour T2 était

faible (Figures 2.5 et 2.6), situation commune dans les systèmes à faible intrant en ASS. Ces résultats concordent avec la littérature qui rapporte que l'augmentation du rendement grain varie selon les localités (Woolfolk *et al.*, 2002). Les résultats selon lesquels, les traitements à apport tardif ont donné de meilleurs rendements dans certains environnements (conditions d'irrigation, différentes quantités totales d'eau enregistrées au cours du cycle et des sols à différents potentiels) ont été précédemment rapportés sur le sorgho en zones arides indiennes (Amiri *et al.*, 2014), sur le blé dans les plaines du Nord-ouest d'Italie (Blandino *et al.*, 2015) et sur le riz dans les plaines des Philippines (Perez *et al.*, 1996).

Aussi le traitement de fertilisation T5, 50% d'engrais apportés tard dans la saison produisait mieux que T4 (100% d'engrais apportés tardivement) sous condition plus humide (N15-I, Figure 2.5). Probablement, le N du traitement à 100% d'engrais a été perdu par lessivage. Ce résultat indique qu'en condition plus humide, la dose réduite d'engrais en apport décalé serait plus bénéfique. Ce résultat est en accord avec ceux de Mon *et al.* (2016) qui ont montré des effets interactifs de l'engrais azoté et les différents traitements d'irrigations sur le rendement en grains du blé dur où N appliqué à la montaison et au stade pré-floral a amélioré les réponses (grains) à l'irrigation (à la disponibilité de l'eau dans le sol). De même, dans notre étude les réponses du sorgho à la fertilisation en particulier à la fertilisation tardive dépendent en partie de la quantité d'eau enregistrée durant la saison et en partie de la fertilisation (dose et période d'application). A Sinthiou Malème 2015, où le début de saison a été lent (pluies progressives et inférieures à 50 mm par décade dans les 8 semaines qui ont suivi le semis, Figure 2.2), les traitements à apport tardif ont donné de bons rendements confirmant l'hypothèse 1 selon laquelle la fertilisation tardive serait bénéfique avec une bonne distribution de la pluie après un démarrage lent de la saison de pluies.

Aussi nous avons pu montrer l'importance de tenir compte des variétés dans l'analyse des conditions permettant de tirer profit de la fertilisation tardive. En effet les variétés tardives ont mieux bénéficié de l'apport tardif comparé aux variétés précoces (Figures 2.7 et 2.9). Ceci est en accord avec Kante *et al.* (2017) qui ont rapporté des rendements en grains variables de sorgho au Mali en fonction du type de matériel génétique (hybrides de grande et petite tailles et variétés locales) et des conditions environnementales.

L'interaction **E*F** a eu aussi un effet significatif sur la biomasse végétative, ce qui est en phase avec les résultats d'autres auteurs (Gheysari *et al.*, 2009; Kiani *et al.*, 2016). Initialement stressés sous les « traitements tardifs » (T4 et T5), les plants ont recouvert leur croissance dans

la plupart des environnements après les applications tardives d'engrais (exemple de N15-P, N16-I, S15-P, Figures 2.8a et b). Ce résultat suggère que l'apport en retard de N a apparemment stimulé la croissance végétative. L'azote affecte la croissance des plantes à travers les divisions et élargissements cellulaires (Stals et Inzé, 2001), ce qui peut par conséquent augmenter la biomasse des plants. Ce résultat indique que le retard de croissance associé au stress azoté en début de phase végétative peut être rattrapé. Cependant, le stress noté sur la biomasse avant les apports tardifs n'a pas affecté l'indice de surface foliaire à la même période. La relation entre la surface foliaire et la biomasse végétale est non linéaire et variable selon la répartition du carbone (Weraduwaage *et al.*, 2015).

2.5.2 Limites de l'étude

La variabilité des conditions expérimentales (texture du sol) a, en dehors de l'effet interactif de l'eau et de la fertilisation étudié aussi influencé les résultats. En effet, l'essai ayant reçu le moins d'eau s'est avéré le plus productif pour tous les traitements de fertilisation et l'essai ayant reçu suffisamment d'eau (N16-I2, 761 mm) a donné les plus faibles rendements (Figure 2.5). Ceci pourrait être expliqué à la fois par les effets positifs du pourcentage élevé d'éléments fins du sol de ce site (limon 8,3% et argile 8,8%) (Tableau 2.1) sur la conservation de l'humidité du sol et de la relative importante teneur en N du sol (228 kg/ha sur 0-30 cm, valeurs comprises entre 167 et 235 kg/ha pour tous les essais) (Tableau 2.3). Des résultats similaires ont été trouvés sur le maïs par Gheysari *et al.* (2009) et sur le tournesol par Sincik *et al.* (2013) et Kiani *et al.* (2016). Ces auteurs ont observé que suivant les traitements d'irrigations, les rendements en grains du maïs et tournesol et en huile brute du tournesol étaient affectés différemment par le niveau de N du sol. Les pluies reçues durant les différentes phases de développement (bonne distribution) auraient affecté positivement la minéralisation de la matière organique, rendant disponible le N pour les plantes à S16-P. Garrido-Lestache *et al.* (2005) ont aussi, observé que la réponse du blé à la dose de N, sa période d'application et son fractionnement variaient selon le climat au cours du cycle de production en conditions méditerranéennes. Ces auteurs attribuent les différences de rendements grains à la variation de la pluviométrie et de N résiduel du sol avant le semis. En raison des conditions expérimentales différentes à Sinthiou Malème en 2016, une analyse de covariance (résultats en Annexe 2) pour dissocier l'effet de la texture du sol (pourcentage de limon en co-variable) de l'eau a été faite. Cependant, à part une diminution de la somme de carré des écarts pour la variable « environnement » (46 854 053 vs. 19 294 501), les probabilités de significativité n'avaient pas changé pour toutes les variables à 5%. Sur la base des résultats obtenus certaines recommandations en termes de fertilisation tardive peuvent

être formulées. Cette étude n'a pas réussi la détermination d'indicateurs précis permettant d'apprécier le démarrage lent de la saison de pluies ou les fréquences de pluies avant et après les apports tardifs qui interagissent avec les nutriments apportés et qui contribueraient aux explications des résultats obtenus.

2.4.3 Recommandations

Les résultats de la présente étude sont utiles pour concevoir des stratégies de fertilisation dans les zones semi-arides et arides d'Afrique sub-saharienne caractérisées par une incertitude pluviométrique et une déficience en nutriments des sols. De manière générale, pour des sites à faible teneur en azote, l'apport tardif d'engrais reste une stratégie valable. Cependant, les résultats de cette étude ont aussi permis de démontrer que la gestion des engrais minéraux pour la production du sorgho dans ces zones devrait combiner la dose, la période d'application suivant le cycle du variété, N initial du sol et la distribution des précipitations afin d'optimiser le rendement des grains. Il apparaît donc que les variétés à cycle long (Soumalemba) répondent mieux à la fertilisation tardive sur les sols à faible teneur en N s'ils reçoivent plus d'eau (≥ 400 mm de la date d'apport tardif à la maturité), alors que les variétés caudatum de cycle court à moyen (Faourou et Soumba), répondent mieux à la fertilisation tardive (forte dose d'engrais) quelles que soient les teneurs en N du sol s'ils reçoivent beaucoup d'eau également (≥ 400 mm). Enfin, il semble que les hybrides (Fadda) répondent mieux à la fertilisation tardive (faible dose d'engrais) indépendamment des teneurs en N s'ils reçoivent une quantité importante d'eau c'est-à-dire plus de 600 mm à partir de la date d'apport tardif à la maturité.

2.6 Conclusion

Les doses d'engrais et période de leur application ont eu un effet significatif sur la croissance (dynamique de la biomasse et l'indice de surface foliaire). La fertilisation tardive a été bénéfique en condition pluviale avec un démarrage lent des pluies. Les applications tardives ont permis aux plants initialement stressés de recouvrer la croissance comme si les apports étaient faits tôt dans la saison. La dose réduite appliquée tard dans la saison a été plus bénéfique que l'apport tardif de la dose entière pour les grains en conditions plus humides. L'hybride Fadda n'a pas répondu mieux à la fertilisation que Faourou, Soumalemba et Soumba. Les variétés à maturité tardive ont mieux bénéficié de l'apport tardif comparé aux variétés précoces. La stratégie de fertilisation tardive a été bénéfique pour le rendement en grains dépendant de l'eau reçue de l'apport tardif à fin remplissage des grains selon les variétés et du potentiel des sites. Les variétés à cycle long répondaient mieux à la fertilisation tardive sur les sols à teneur

faible en N alors que les variétés à cycle court performaient mieux sur les sols à faible et forte teneurs en N avec une quantité minimale d'eau de 400 mm de l'application tardive à la maturité. Les hybrides répondent mieux à cette stratégie indépendamment de la teneur en N du sol avec des quantités d'eau au-dessus de 600 mm. Cette étude est quelque peu limitée en raison du petit nombre de traitement de fertilisation (dose et dates d'apport) et de régimes hydriques considérés. Afin de faire des recommandations de fertilisation aux agriculteurs sur la base des prévisions météorologiques, un modèle dynamique de simulation de culture est nécessaire pour (i) reproduire les observations et évaluer les modalités de fertilisation tardives testées et (ii) explorer avec un jeu de données climatiques historiques plusieurs stratégies de fertilisation pour le sorgho dans les zones semi-arides ou arides.

Chapitre 3 : Calibration et évaluation des performances du modèle DSSAT-CSM-CERES-Sorghum dans la simulation des réponses du sorgho à des apports contrastés d'azote

Ce chapitre a fait l'objet de posters

1- Komla Ganyo, Bertrand Muller, Gerrit Hoogenboom, Myriam Adam, 2016. **Improving Decision Support Tools to Define better Cereals Fertilization Strategies based on Climate Information in Sahel**. DAF-AFAAS-SASAE conference, 29 October – 3 November 2017, Durban South Africa. Poster

2- Komla Ganyo, Bertrand Muller, Aliou Guissé, Gerrit Hoogenboom, Myriam Adam, 2016. **Modeling Sorghum and Millet Genotypes Responses to Several Fertilizer Applications in order to Optimize Fertilizers use according to Climate**. AgMIP6, 28-30 juin 2016 Montpellier, France. Poster

3.1 Résumé

La pauvreté des sols en nutriments et la variabilité pluviométrique accentuées par le changement climatique en Afrique Sub-Saharienne imposent une gestion alternative de la fertilisation. Les modèles dynamiques de cultures sont des outils qui peuvent aider dans la compréhension des réponses de variétés à la fertilisation et l'optimisation des applications d'engrais. L'objectif de cette étude est d'évaluer la capacité de DSSAT-CSM-CERES-Sorghum à simuler la réponse du sorgho à différentes options de gestion de la fertilisation, en particulier à la fertilisation tardive. Les données d'expérimentation collectées à Nioro du Rip et Sinthiou Malème (Sénégal) en 2015 et 2016 sur 4 variétés de sorgho (Fadda, Faourou, Soumalemba et Soumba) en condition non stressée en azote et eau (T2), stress azoté dû à une réduction de la dose de N (T1 et T3) et de stress azoté lié à un apport tardif (T4 et T5) ont été utilisées. DSSAT-CSM-CERES-Sorghum a été capable de simuler la biomasse finale et le rendement grain avec des erreurs de prédiction (NRMSE = 10 - 30% pour la biomasse et 14 - 38% pour le grain) comprises dans la gamme de variation des erreurs d'observation (CV= 5-44% pour la biomasse et 1-50% pour le grain) en condition non stressée en azote et eau (T2). A l'évaluation, les erreurs de prédiction de la biomasse et du grain sont respectivement de 5 à 38% et de 27 à 66% contre 11 à 62 % et 21 à 65% en observation. Les résultats montrent que DSSAT-CSM-CERES-Sorghum simule la réduction de rendements (biomasse et grain) due à une diminution de N apporté. Cependant, si le stress azoté est important (T1, pas d'apport d'engrais), le niveau ou l'effet du stress azoté sur l'accumulation de biomasse pendant la phase végétative semble être surestimé. A doses identiques de N mais apportées à différentes dates (pratique recommandée vs. apport tardif), le stress N lié aux apports tardifs reproduit par le modèle est trop atténué en phase reproductive en termes d'effet sur le rendement grain, mais correctement simulé en phase végétative en termes d'effet sur le rendement biomasse. Nous proposons de réduire la réponse de l'effet du stress sur le processus de photosynthèse pendant la phase végétative et d'ajuster le stress azoté pendant la phase reproductive pour prendre en compte un stress plus important sur les rendements grains lors d'un apport tardif d'azote.

Mots clés : DSSAT-CSM-CERES-Sorghum, calibration, évaluation, stress azoté, biomasse et grain.

3.2 Introduction

Les systèmes de production agricole en Afrique en général et en Afrique Sub-Saharienne (ASS) en particulier sont dominés par la culture des céréales. Les céréales sont une source importante d'alimentation en ASS. Cependant, leur productivité est faible en raison de faibles utilisations des intrants agricoles, faible restitution des résidus de récolte et une rapide croissance démographique. Les sols intrinsèquement pauvres et les conditions climatiques défavorables sont d'autres raisons de la faible productivité (MacCarthy *et al.*, 2010). En effet, les précipitations inadéquates ou mal réparties (mauvaises distributions des pluies) et les faibles niveaux d'azote (N) et de phosphore (P) dans le sol affectent grandement la productivité des cultures (Bationo *et al.*, 2003). Aussi, le changement climatique et son impact à long terme sur les systèmes de production dans le monde et en ASS en particulier, constituent une question cruciale pour le monde scientifique, les producteurs, les bailleurs et les décideurs.

Les agriculteurs sont de plus en plus encouragés et soutenus dans l'utilisation des engrais organiques et minéraux dans les systèmes agraires. Cependant, malgré les rôles établis et démontrés de N, P et potassium (K) dans la production des cultures, l'efficacité des engrais lorsqu'ils sont utilisés est variable en ASS du fait des impacts de la variabilité des pluies et des changements observés dans le climat. L'utilisation d'outils capables de décrire et rendre compte des impacts de différentes options de gestion de cultures dans les systèmes de production est un atout pour évaluer l'effet des apports contrastés d'engrais dans les systèmes agricoles (Rinaldi, 2004; Ganyo *et al.*, 2016).

Les modèles de simulation de cultures tel Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT) version 4.7 (Hoogenboom *et al.*, 2017) décrivent les dynamiques de croissance des cultures, de l'eau et des nutriments du sol, des résidus de cultures comme fonction du climat, de l'historique de la parcelle de culture et de la gestion des cultures (itinéraire cultural) dans un pas de temps journalier. Ce sont des outils qui permettent de rendre compte des effets d'interactions sol-climat-gestion des cultures sur la productivité des cultures. Le modèle CSM-CERES-Sorghum du DSSAT utilisé dans cette étude a fait l'objet de plusieurs travaux menés dans le monde par des écologistes et agronomes afin d'appréhender par exemple la croissance du sorgho sous diverses conditions environnementales (White *et al.*, 2007, 2015), la sensibilité du sorgho au réchauffement global au Botswana (Chipanshi *et al.*, 2003), l'impact du réchauffement global sur les fenêtres de dates de semis du sorgho au Brésil (Grossi *et al.*, 2013), l'impact de l'augmentation du CO₂ associé à différentes stratégies de gestion de

l'irrigation dans la culture du sorgho (Fu *et al.*, 2016), les dynamiques de N, P et eau du sol dans les systèmes de cultures en ASS (Adam *et al.*, 2018; Amouzou *et al.*, 2018).

Cependant, parmi les études de modélisation du sorgho, pas ou peu se sont intéressées à l'effet des apports tardifs d'azote. Il est donc important d'évaluer si le modèle est capable de rendre compte de cela. Avant d'être utilisé pour évaluer les réponses de différentes variétés de sorgho à des apports contrastés d'azote qui pourraient être dictés par les prévisions climatiques saisonnières (interactions variétés*eau*fertilisation) et pouvoir générer des recommandations en termes de fertilisation aux paysans, le modèle a besoin d'être paramétré et évalué pour les variétés d'intérêt au Sénégal. Ainsi, ce chapitre a pour objectif d'appréhender les réponses du sorgho à différentes options de gestion de la fertilisation, en particulier à de la fertilisation azotée tardive dans un souci d'optimisation de celle-ci dans le contexte de variabilité pluviométrique en ASS. Spécifiquement il s'agit de :

- (i) Calibrer et valider le modèle CERES-Sorghum implémenté dans DSSAT v4.7 pour simuler la croissance des variétés du sorgho et les rendements grain et biomasse, en conditions optimales (T2) ;
- (ii) Évaluer la réponse du modèle à différentes modalités d'apport d'azote (dose et temps d'application) en particulier l'apport azoté tardif

3.3 Matériel et méthodes

3.3.1 Description du DSSAT-CSM-CERES-Sorghum

Le Cropping System Model-Crop Estimation through Resource and Environment Synthesis-Sorghum (CSM-CERES-Sorghum) implémenté dans DSSAT version 4.7 (Hoogenboom *et al.*, 2017), est un modèle de simulation qui prédit le rendement, les bilans hydrique et de nutriments associés à la dynamique de croissance du sorgho, à des intervalles de temps journalier, du semis à la maturité physiologique ou à une date spécifique de récolte. Ce modèle utilise des données du sol, du climat et de la gestion des cultures.

La phénologie du sorgho est modélisée comme une série de phases délimitées par des stades de développement comprenant l'émergence ou levée, la fin de la phase juvénile (phase pendant laquelle les plantes sont insensibles à la photopériode (Alagarswamy *et al.*, 1998), l'initiation paniculaire, l'apparition de la feuille drapeau, l'anthèse et la maturité physiologique. La phénologie et la croissance des plantes sont décrites par des coefficients génétiques spécifiques aux variétés/cultivars, dépendant de la photopériode, du temps thermal, de la réponse à la

température et de la répartition de la matière sèche entre les différents organes. Le modèle tient compte des effets de la température sur la croissance des cultures et du taux de remplissage des grains en se basant sur des températures cardinales et supposant des réponses trapézoïdales avec une température de référence de 8°C, optimale inférieure de 20 °C, optimale supérieure de 40 °C et une maximale de 44 °C pour la photosynthèse et respectivement de 7°C, 22°C, 27°C et 35°C pour le taux de remplissage des grains. Le temps thermal (TT, équation 3.1), correspondant à la durée des phases de l'émergence à la fin de la phase juvénile (P1), de la fin phase juvénile à l'initiation paniculaire (P2), de l'apparition de la feuille drapeau à la floraison (P3), et du début remplissage des grains à la maturité physiologique (P5) est calculé en sommant les différences de températures moyennes journalières au-dessus de la température de base (11°C) pour la durée de chaque phase.

$$(3.1) \quad TT = \sum_{i=1}^n ([(TMAX + TMIN) / 2] - TBASE)$$

Où n est la durée de la phase en jour, TMAX est la température maximale journalière, TMIN est la température minimale journalière et TBASE est la température de base.

Par ailleurs, le modèle est dominé par deux processus principaux :

- le processus de capture et conversion des ressources où les photosynthétats produits par la photosynthèse sont déterminés par des facteurs pédo-climatiques incluant le rayonnement solaire, le CO₂, la température, l'azote disponible et l'état hydrique ou de l'eau du sol et ;

- la distribution des métabolites ou photosynthétats aux différents organes.

La croissance des plantes, y compris l'indice de surface des feuilles (LAI), est simulée en utilisant les premières approches appliquées au blé (et au maïs dans CERES (Ritchie et Otter, 1985; Jones et Kiniry, 1986), puis adaptées au sorgho et au mil. La surface foliaire potentielle du brin maître en cm² (PLA, équation 3.2) est modélisée par plant en utilisant la fonction Gompertz,

$$(3.2) \quad PLA = A \times e^{\{-10.34 \times e^{[-(0.13 + 0.003 G1) \times LVN]}\}}$$

où A est la surface foliaire maximale qu'une plante peut atteindre (actuellement supposée être invariante à 6000 cm².plante⁻¹), G1 est le scalaire pour la taille relative des feuilles. LVN est le nombre cumulé de feuilles (phyllochrone), qui est prédit à partir de l'incrément de temps thermal quotidien (DTT) et de l'intervalle de phyllochrone (PHINT).

La production quotidienne potentielle de biomasse par plante, PCARB (équation 3.3) est calculée à l'aide de l'équation suivante :

$$(3.3) \quad \text{PCARB} = \text{RUE} \times \text{PCO}_2 \times (\text{PAR}/\text{PLTPOP}) \times [1.0 - e^{(-\text{LIFAC} \times \text{LAI})}]$$

où RUE est l'efficacité de l'utilisation de la radiation solaire ; PCO₂ est le facteur pour ajuster la production d'assimilats en fonction du CO₂ atmosphérique ; PAR, la part de la radiation photo-synthétiquement active ; PLTPOP est la population de plants ; LIFAC, le coefficient d'extinction d'interception de la lumière et LAI l'indice de surface foliaire (White *et al.*, 2015).

Le modèle CERES-Sorghum simule la réponse des cultures à la fertilisation par la simulation de dynamiques de l'eau du sol, de l'azote (N), du carbone (C) organique et de leurs interactions avec les pratiques de gestion des cultures y compris le labour (White *et al.*, 2010) à partir des sous-modules de bilan hydrique et azoté communs aux différentes cultures, et des sous-modules de croissance et développement spécifique au sorgho.

La composante « N » des modules dans DSSAT est étroitement liée aux composantes « eau » et « croissance des cultures ». Les transformations de N dans les sols (non inondés) requièrent des modules de minéralisation et d'immobilisation. Le modèle simule la décomposition de la matière organique fraîche (FOM) et le renouvellement associé de N organique frais (FON). Au fur et à mesure que la matière organique se décompose, une partie de N est requise par le processus de décomposition et peut être incorporée dans la biomasse microbienne, i.e. immobilisation.

Au sein du module N, un facteur de stress N est calculé selon la concentration en N de la plante et la disponibilité de ce N dans le sol. Ce facteur modifie la photosynthèse et l'expansion des feuilles, la sénescence et le partitionnement de la matière sèche. En effet, les modèles DSSAT fournissent des résultats sommaires décrivant le stress moyen azoté qui prévaut durant chacune des étapes de croissance de la culture. Ceux-ci sont calculés à partir des valeurs journalières des indices de déficience en N pour la photosynthèse par unité de surface (NDEF1), pour le processus d'expansion des feuilles, la sénescence et le partitionnement (NDEF2) et la concentration en N des grains (NDEF3). Généralement, avec l'apparition du stress azoté, les processus de photosynthèse sont réduits et ceux de la croissance par expansion et partitionnement sont sévèrement affectés (Godwin et Singh, 1998).

Les descriptions détaillées sur les dynamiques de l'eau du sol et bilan de N et C sont données dans Ritchie (1998) et Godwin et Singh (1998). Comparé à la version précédente (v4.6), un

module phosphore est implémenté dans DSSAT-CSM-CERES-Sorghum v4.7 (Adam *et al.*, 2018).

3.3.2 Les expérimentations

Les essais utilisés pour la calibration et l'évaluation du modèle DSSAT-CSM-CERES-Sorghum sont récapitulés dans le tableau 3.1. En fonction de la qualité des expérimentations (conditions non limitantes en eau et niveau de rendements, chapitre 2) et les exigences de la calibration du modèle (choix de dates de semis décalés pour l'appréciation de la photosensibilité des variétés), trois essais (N15-I, N16-I2 et S16-P) ont été choisis pour la calibration et les trois autres (N15-P, N16-I et S15-P) pour l'évaluation. Les précédents culturaux, les dates de semis, de fertilisation (et les quantités d'engrais apportés), d'irrigation (méthode et quantité d'eau), les données météorologiques journalières (pluies, températures minimale et maximale, humidité relative, vitesse du vent et le rayonnement global) et analyses du sol de 2015 et 2016 (chapitre 2) sont les entrées du modèle. Les paramètres de sol utilisés pour les simulations sont présentés dans le chapitre 2. Les données utilisées pour la calibration et l'évaluation du modèle sont les dates de floraison et de maturité, la dynamique de l'indice de surface foliaire (LAI), la dynamique de la biomasse végétative (feuilles + tiges), le nombre de feuilles, rendement grain et biomasse finale. Le LAI et la biomasse végétative ont été mesurés au tallage (avant l'apport tardif de N), à la montaison (entre deux apports tardifs de N) et à la floraison (après l'apport tardif de N) alors que le nombre de feuilles a été mesurés tous les 10 jours à partir de 30 JAS jusqu'à 10 jours après floraison. A la récolte, la biomasse finale et le rendement grain ont été évalués. Cinq modalités de fertilisation (T1 à T5) ont été testées sur quatre variétés (Fadda, Faourou, Soumalemba et Soumba) (chapitre 2), cependant les traitements T2 (i.e. conditions de croissance non limitantes en eau et nutriments) de chaque variété ont été utilisés pour la calibration-évaluation du modèle.

Tableau 3.1 : Résumé des essais utilisés pour la calibration et évaluation du modèle

Essais	Code	Année	Date de semis	Densité de semis (plants/ha)	Conditions expérimentales	Observations	Usage
Nioro du Rip irrigué	N15-I	2015	1/07/2015	62 500	Complément d'irrigation, 5 modalités de fertilisation (apport NPK + urée)	Dates floraison et maturité, dynamiques de biomasse végétative, indice foliaire, nombre de feuille, rendement grain et biomasse	Calibration
Nioro du Rip Semis 2	N16-I2	2016	29/07/2016	62 500	Pareil que N15-I	Dates floraison et maturité, rendement grain et biomasse	Calibration
Sinthiou Malème 2016	S16-P	2016	25/07/2016	62 500	Pluvial strict, 5 modalités de fertilisation (apport NPK + urée)	Pareil que N15-I	Calibration
Nioro du Rip pluvial	N15-P	2015	2/07/2015	62 500	Pluvial strict, 5 modalités de fertilisations (apport NPK + urée)	Dates floraison et maturité, dynamiques de biomasse végétative, indice foliaire, nombre de feuille, rendement grain et biomasse	Evaluation
Nioro du rip Semis 1	N16-I	2016	28/06/2016	62 500	Pareil que précédent	Pareil que N15-P	Evaluation
Sinthiou Malème 2015	S15-P	2015	10/07/2015	62 500	Pluvial strict, 5 modalités de fertilisations (apport NPK + urée)	Dates floraison et maturité, rendement grain et biomasse	Evaluation

3.3.3 Calibration

Le modèle a été calibré en utilisant les essais de dates de semis contrastées N15-I et N16-I2 conduits respectivement en 2015 et 2016 à Nioro du Rip avec un écart de 28 jours entre les semis (N15-I et N16-I2) et S16-P à Sinthiou Malème (conditions optimales de croissance).

3.3.3.1 Phénologie et sensibilité à la photopériode : calcul de coefficients génétiques

La phénologie a été calibrée en utilisant les données des essais N15-I, N16-I2 et S16-P. Les valeurs en temps thermal de P1, P2, P3 et P5 (paramètres explicités plus haut), P2O (durée du jour le plus long au-delà de laquelle la croissance est ralentie), P2R (durée en degré jour où le développement phasique conduisant à l'initiation paniculaire est retardé à chaque augmentation d'une heure de la photopériode au-dessus de P2O), et PANTH (durée en degré jour de la phase de l'initiation paniculaire à la floraison) ont été calculées pour chaque variété. Les valeurs de P1, P2, P3, P5 et PANTH (en degré jour) calculées à partir des données observées (Tableau 3.2) ont été ajustées manuellement afin que les dates de floraison et maturité simulées correspondent ou soient proches de celles observées. La valeur par défaut de la durée de la phase, début de la floraison à début remplissage des grains (P4), a été considérée pour les 4 variétés (Tableau 3.3) car cette mesure n'a pas été faite sur le terrain mais elle est considérée constante pour toutes les variétés. La détermination de P2O et P2R a été obtenue et ajustée en fonction des essais N15-I et N16-I2 (28 jours d'écart entre les deux semis). Les valeurs de l'intervalle en temps thermal d'apparition d'une feuille (phyllochrone) issues des travaux de thèse de Malick Ndiaye (essais conduits de 2014 à 2016 à Bambey, Nioro du Rip et Sinthiou Malème) ont été utilisées comme base puis ajustées. Les dates de maturité ont été ajustées en ajoutant 25 jours à la date de floraison car il n'y avait que les dates de récolte qui ne correspondent pas aux dates de maturité physiologique.

Tableau 3.2 : Valeurs calculées à partir des données expérimentales de quelques coefficients génétiques

	Fadda	Faourou	Soumalembe	Soumba
P1	269	320	300	410
P2	247	290	274	180
P2R	596	589	226	46
PANTH	873	900	722	799
P3	227	189	178	146
P5	450	483	434	440

3.3.3.2 Croissance et rendement final

Les essais de N15-I et S16-P ont servi à calibrer l'indice de surface foliaire (LAI), le nombre de feuilles apparues et la biomasse au cours du cycle. L'essai N16-I2 n'ayant pas de données de mesures dynamiques de LAI, nombre de feuilles apparues et biomasse a été abandonné pour cette calibration. Les indices G1 (tailles des feuilles) issus de la calibration de Fadda et Soumalembe par Adam *et al.* (2018) ont été utilisés et ajustés pour approcher les valeurs observées de LAI et biomasse.

Les trois essais (N15-I, N16-2 et S16-P) ont été utilisés pour calibrer la biomasse finale et rendement grain. L'indice d'allocation de la biomasse en grain (G2) de Adam *et al.* (2018) a été ajusté pour avoir le rendement grain simulé similaire ou égal au rendement grain observé.

3.3.3.3 Autres paramétrages

La valeur de l'efficience d'utilisation de la radiation solaire (RUE) et le coefficient de partitionnement de la biomasse végétative (STPC) utilisés sont de 3,8 et 1 respectivement. Pour tenir compte de la fertilité des différentes parcelles d'expérimentation, la valeur par défaut du facteur de fertilité du sol (SLPF = 1) a été initialisée en fonction de la fertilité du sol des différentes expérimentations et résultats du chapitre 2. Ainsi, la valeur de SLPF pour N15-I et S16-P a été réduite à 0,9 et ajustée à 0,8 pour l'essai N16-I2.

3.3.4 Evaluation du modèle

La validation ou évaluation est faite pour les dates de floraison et maturité, la biomasse finale et rendement grain en considérant les essais N15-P, N16-I conduits à Nioro du Rip (respectivement en 2015 et 2016) et S15-P à Sinthiou Malème en 2015 alors que N15-P et N16-I ont été considérés pour l'évaluation des autres paramètres (LAI, biomasse au cours du cycle et nombre de feuilles apparues). Les mesures dynamiques n'ont été faites que partiellement sur S15-P parce que l'essai présentait un mauvais état de développement d'où le choix de ne pas en tenir compte. La valeur de SLPF a été ajustée à 0,9 pour N15-P et à 0,8 pour N16-I et S15-P.

Afin d'évaluer la qualité des sorties du modèle (ou niveau de précision du modèle) à la calibration et évaluation, des indices tels :

- ✓ la moyenne d'erreur absolue relative (relative mean absolute error, rMAE, équation 3.4) pour les variables à mesures dynamiques (LAI, biomasse et nombre de feuilles

apparues) est calculée, considérant une valeur rMAE de 0,3 acceptable (Mayer et Bulter, 1993). Cet indice permet de pondérer les écarts entre valeurs simulées et mesurées pour les observations dynamiques ;

(3.4)

$$rMAE = \frac{(\sum |S_i - O_i|)/n}{M} \times 100$$

Le rMAE est calculé en prenant en compte les trois premières mesures (1^{er}, 2 et 3^e prélèvement) de biomasse, les trois mesures de LAI et toutes les mesures du nombre de feuille jusqu'à dix jours après la floraison. Le 4^e prélèvement de biomasse (prélèvement à la récolte) n'a pas été incorporé dans les calculs car le modèle ne simule pas la senescence en fin de cycle, ce qui est observé sur la plupart de nos essais.

- ✓ l'erreur quadratique moyenne (Root Mean Square error RMSE, équation 3.5) et sa normalisée (Normalized Root Mean Square error, NRMSE, équation 3.6) pour les dates de floraison, maturité, rendement grain et biomasse ont été calculées. Le coefficient de variation (CV, équation 3.7) a été calculé pour chaque essai en prenant la valeur des répétitions. Les prédictions du modèle sont satisfaisantes lorsque l'erreur de prédiction relative (NRMSE) est comprise dans l'erreur d'observation (CV).

(3.5)

$$RMSE = \left[n^{-1} \sum (S_i - O_i)^2 \right]^{0,5}$$

(3.6)

$$NRMSE = \left[n^{-1} \sum (S_i - O_i)^2 \right]^{0,5} * \frac{100}{M}$$

(3.7)

$$CV = \frac{\left(\frac{\sum (O_i - M)^2}{n} \right)^{0,5}}{M} * 100$$

Où n : nombre d'observation, i : ième mesure, S_i : valeur simulée, O_i : valeur observée et M : moyenne des valeurs observées.

3.3.5 Analyse de la réponse du modèle au stress azoté

L'évaluation du comportement du modèle sous diverses conditions environnementales devrait démontrer sa robustesse à simuler les réponses à différentes dates d'application d'azote. Trois situations de stress azoté ont été considérées à savoir (i) stress lié au non-apport d'azote (T1),

(ii) stress lié à un apport réduit d'azote (T3) et (iii) stress lié à un apport tardif d'azote (T4 et T5). Supposant un même comportement du modèle pour les quatre variétés (non-significativité de l'interaction variété-fertilisation pour le grain, Tableau 2.4 chapitre 2), les données par niveau de stress ont été combinées pour évaluer la sensibilité ou capacité du modèle à reproduire les différents stress azotés imposés au cours de nos expérimentations. L'évaluation a été faite sur les paramètres de rendements (biomasse et grain). Les performances du modèle dans la simulation des réponses du sorgho dans les différentes situations de stress ont été évaluées en comparaison avec les simulations en condition de stress azoté minimal (T2), simulations de calibration et évaluation du modèle. Les résultats de cette comparaison informeront sur la capacité du modèle à simuler la réduction de rendements liée à une réduction de N et/ou une réduction de rendements liée à un apport tardif de N tels globalement observés en expérimentation.

3.4 Résultats

3.4.1 Calibration et évaluation

3.4.1.1 Phénologie et sensibilité à la photopériode

Le tableau 3.3 présente les coefficients génétiques calibrés pour la simulation de la phénologie des différentes variétés de sorgho et la Figure 3.1 représente les dates de floraison et de maturité observées comparées aux dates de floraison et maturité simulées des 4 variétés de sorgho par DSSAT-CSM-CERES-Sorghum. Le nombre de degré jour (°CJ) de l'émergence à l'initiation paniculaire ($P1 + P2$) et de l'initiation paniculaire à la floraison (PANTH) a varié respectivement de 380 à 560 °CJ et de 617,5 à 760,5 °CJ selon les variétés. La sensibilité à la photopériode (P2R) est simulée avec une sensibilité très forte à la photopériode chez Soumalembe (1800 °C jour) et très faible chez Faourou (46 °C jour). Le phyllochrone est compris entre 49 et 55 (Tableau 3.3).

Tableau 3.3 : Coefficients génétiques développés pour la calibration des 4 variétés de sorgho et utilisés pour l'évaluation

Variables	Paramètres	Par défaut	Fadda	Soumalemba	Soumba	Faourou	Source
P1	Temps thermal de l'émergence à la fin du stade juvénile (degré jour au-dessus de la température de base (TB))	180	200	400	280	300	Calculé et ajusté
P2	Temps thermal de la fin du stade juvénile à l'initiation paniculaire (degré jour au-dessus de TB)	400	300	160	100	100	Idem
P2O	Durée (longueur) de jour critique au-dessus de laquelle le développement est ralenti (réponse de jour court)	12,74	12,6	12,6	12,6	12,6	Idem
P2R	Sensibilité à la photopériode où le développement est retardé pour chaque heure qui s'ajoute au P2O	40	655	1800	180	46	Idem
PANTH	Temps thermal de l'initiation paniculaire à la floraison/anthèse (degré jour au-dessus de la TB)	617,5	617,5	760,5	722,5	717,5	Idem
P3	Temps thermal de la fin de l'expansion de la feuille drapeau à la floraison (degré jour au-dessus de la TB)	50	185	189	148	133	Idem
P4	Temps thermal de la floraison au début remplissage des grains (degré jour au-dessus de la TB)	81,5	81,5	81,5	81,5	81,5	Par défaut
P5	Temps thermal du début remplissage des grains à la maturité physiologique (degré jour au-dessus de TB)	600	380	483	400	400	Calculé et ajusté
PHINT	Phyllochrone : temps thermal entre l'apparition de deux feuilles successives	49	49	55	49	50	Ndiaye, 2018 et ajusté
G1	Scalaire pour la taille relative des feuilles	5	15	5	12	3	Adam <i>et al.</i> 2018
G2	Scalaire pour le partitionnement des assimilats à la panicule	6	3	1,5	2,8	4,5	et ajusté

DSSAT-CSM-CERES-Sorghum prédit la date de la floraison moyenne observée de Fadda (84 JAS), Faourou (74 JAS), Soumalemba (107 JAS) et Soumba (75 JAS) avec respectivement un RMSE (NRMSE) de 4,9 jours (6%), 5,5 jours (7%), 3,6 jours (3%) et 2,4 jours (3%). La maturité physiologique moyenne observée de Fadda (112 JAS), Faourou (93 JAS), Soumalemba (138 JAS), et Soumba (104 JAS) est simulée avec respectivement un RMSE (NRMSE) de 1,8 JAS (2%), 3,5 JAS (4%), 5,1 JAS (4%), et 3,3 JAS (3%). Le modèle prédit les dates de floraison et maturité physiologique avec des valeurs d'erreurs moyennes de prédiction (NRMSE) comprises dans l'erreur d'observation (CV) (Figure 3.1). Le modèle est donc satisfaisant dans la reproduction des cycles des quatre variétés.

En ce qui concerne l'évaluation du modèle pour la phénologie, de manière générale il la simule bien mais il y a une tendance à simuler la floraison de N16-I précocement (Figure 3.1, 3^{ème} point extrême droite). Les dates de floraison et de maturité des 4 variétés de sorgho sont prédites avec une erreur de prédiction (RMSE) inférieure ou égale à 10% (Figure 3.1), ce qui est acceptable pour la phénologie.

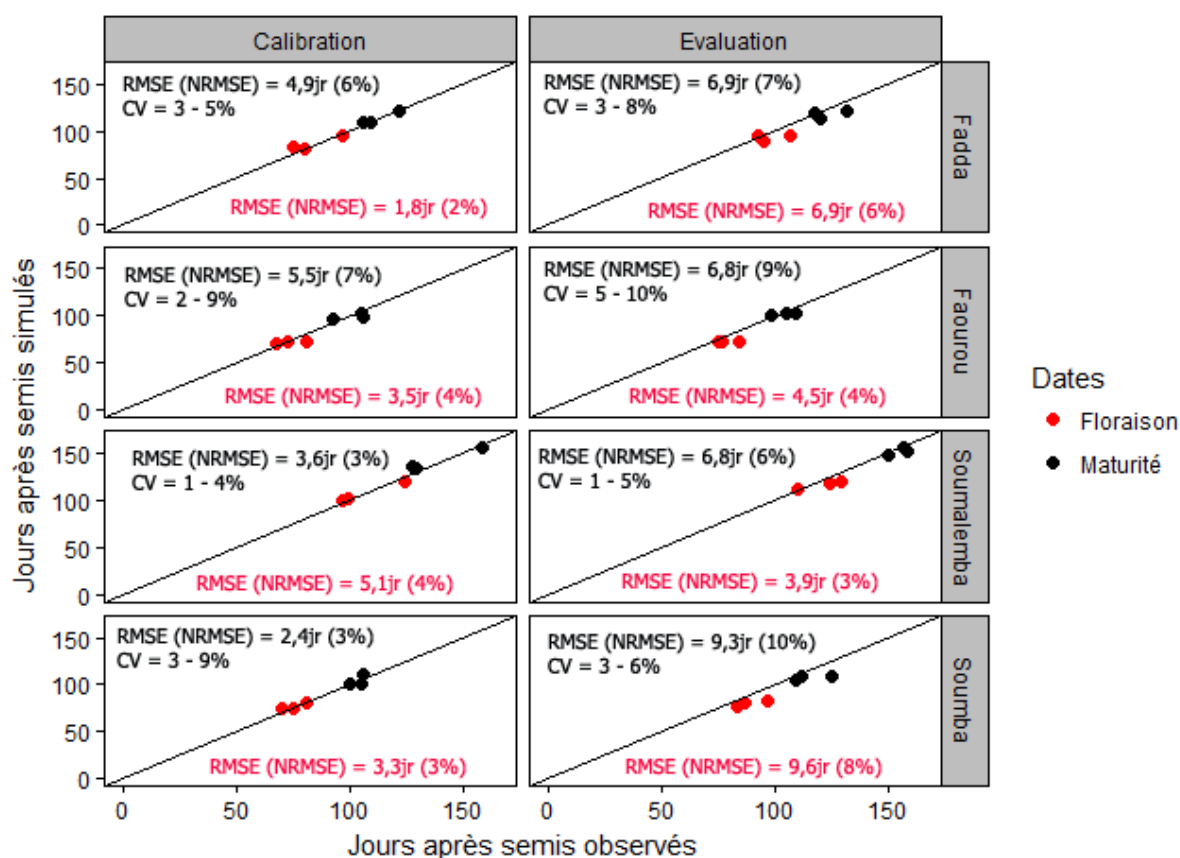


Figure 3.1 : Comparaison des dates de floraison (points rouges) et maturité (points noirs) observées et simulées des quatre variétés dans les six environnements

CV : Coefficient de Variation, RMSE (Root Mean Square Error) : Erreur quadratique moyenne, NRMSE (Normalized Root Mean Square Error) : Erreur quadratique moyenne normalisée

3.4.1.2 Calibration et évaluation de la dynamique de LAI, biomasse et du phyllochrone

Les figures 3.2, 3.3, 3.4 présentent les simulations et mesures observées de LAI, biomasse végétative et nombre de feuilles apparues. Les indices de rMAE calculés sont répertoriés dans le tableau 3.4. Même si certaines valeurs simulées de LAI sont sous-estimées pour Faourou (Figure 3.2b) et surestimées pour Soumalembe (Figure 3.2c), les tendances de dynamique de croissance (biomasse végétative et LAI) sont généralement bien représentées par le modèle (Figures 3.2, 3.3 et 3.4). Les valeurs de rMAE obtenues (excepté rMAE du LAI chez Faourou et Soumalembe) sont inférieures ou égales à 0,3 (Tableau 3.4). Cependant, il est important de noter que la biomasse végétative décomposée en biomasses feuilles et tiges est mal simulée, généralement surestimées pour les feuilles et sous-estimées pour les tiges de Fadda et Soumalembe avec des valeurs de l'erreur absolue relative (rMAE) globalement supérieures à 0,3 (Tableau 3.4). Par ailleurs, il y a un bon ajustement entre le phyllochrone (nombre de feuilles apparues) observé et simulé (Figure 3.4).

Le modèle reproduit bien la dynamique de croissance des plantes dans les essais d'évaluation (N15-P et N16-I). Globalement pour les paramètres de croissance (LAI, biomasse végétative et le nombre de feuilles), les simulations issues du modèle sont acceptables avec des valeurs de rMAE inférieures à 0,3 (Tableau 3.4) excepté pour le LAI de Faourou qui est sous-estimé (Figure 3.2) et la biomasse de Soumalembe et Soumba qui est surestimée (Figure 3.3).

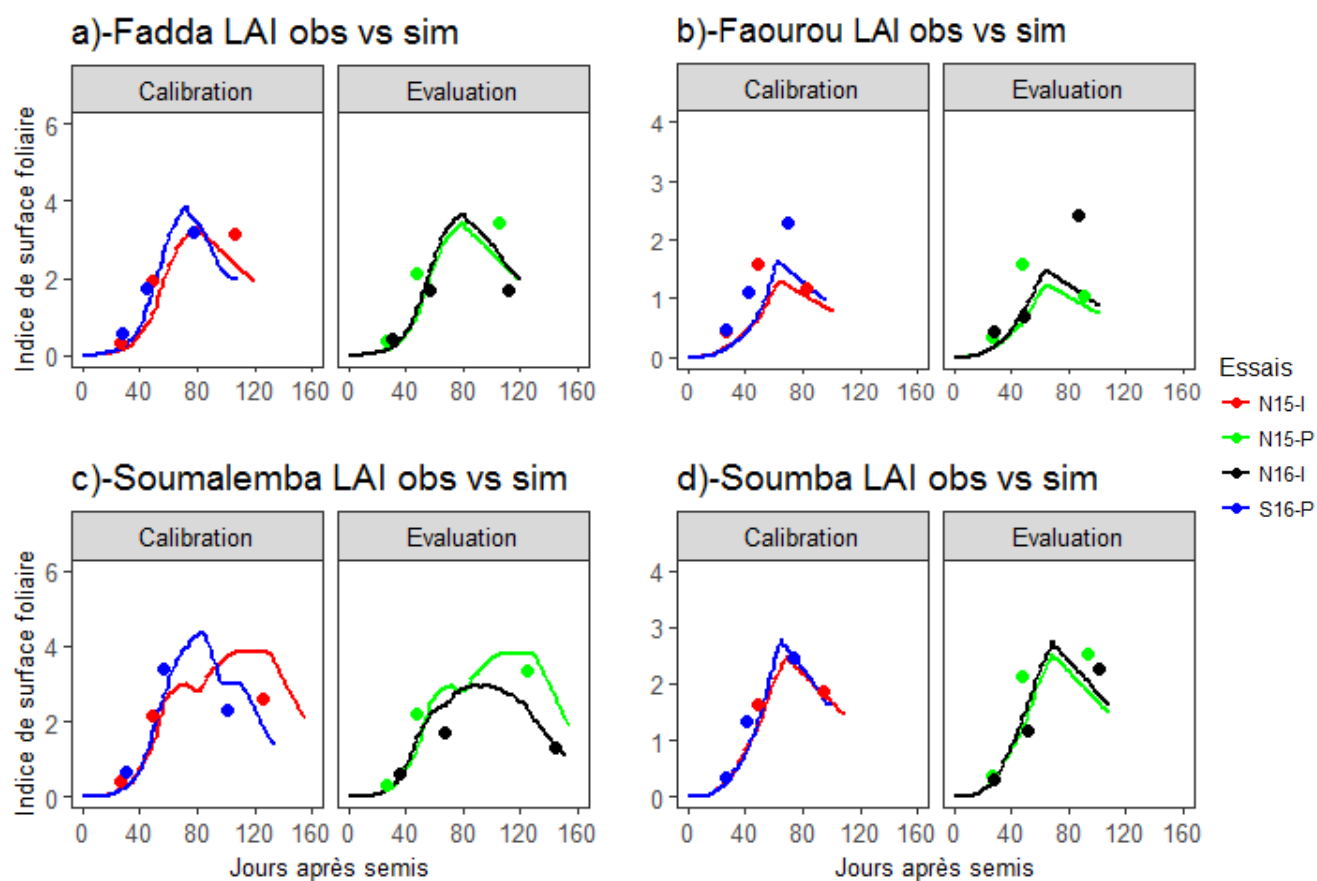


Figure 3.2 : Simulation de la dynamique de l'indice de surface foliaire pour toutes les variétés en conditions optimales

En points, les observations (obs) et en lignes, les simulations (sim)

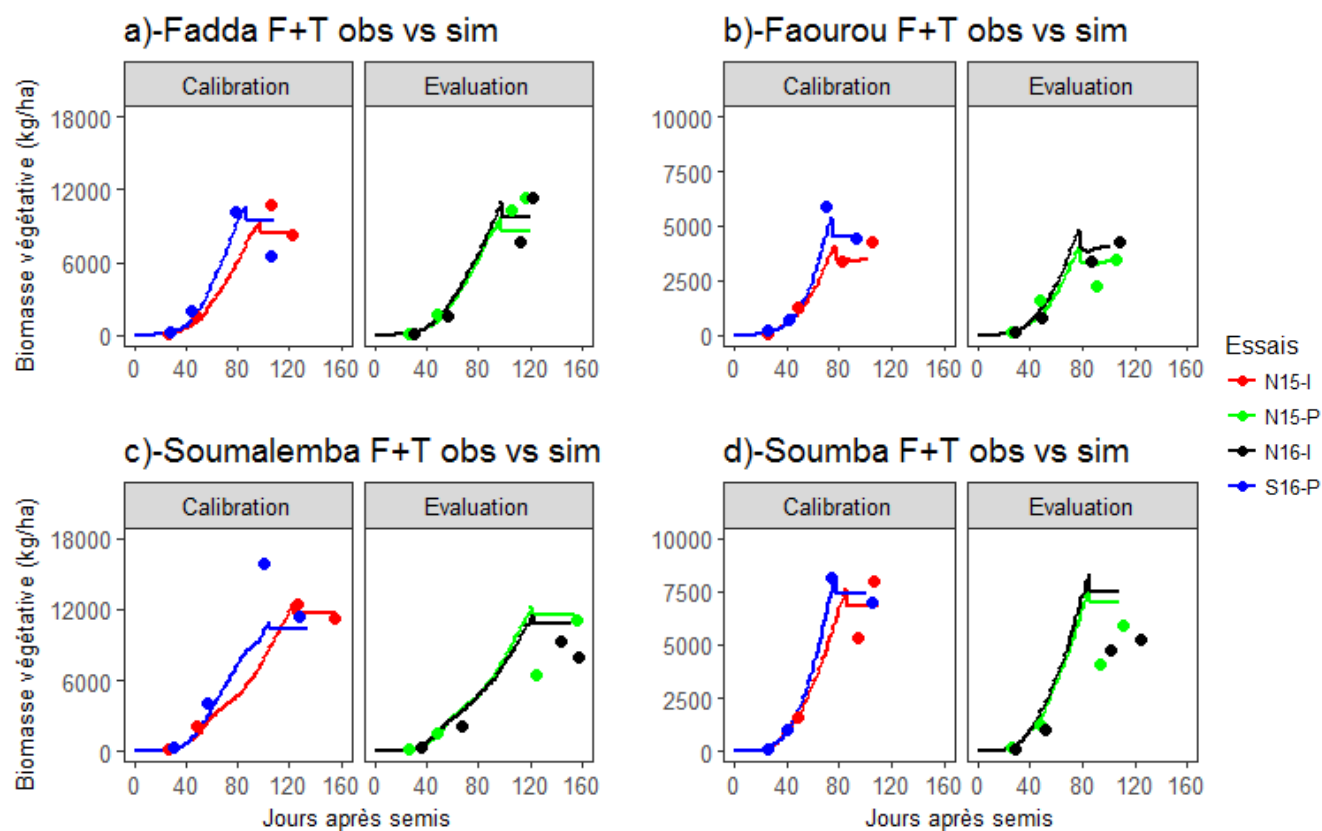


Figure 3.3 : Simulation de la biomasse végétative (F+T, Feuilles et tiges) au cours du cycle pour toutes les variétés en conditions optimales

En points, les observations et en lignes, les simulations

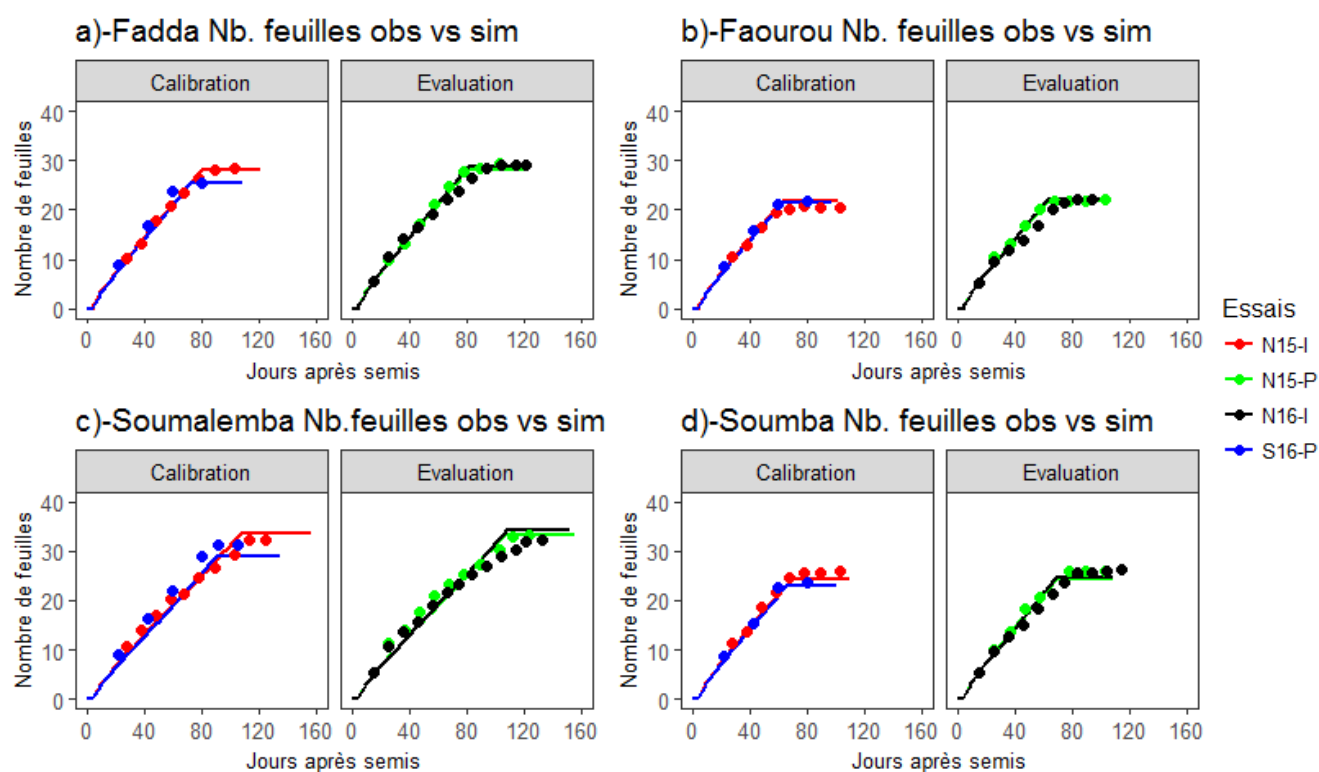


Figure 3.4 : Simulation du nombre de feuilles apparues (Nb. feuilles) durant le cycle pour toutes les variétés en conditions optimales

En points, les observations et en lignes, les simulations

Tableau 3.4 : Indices de performances du modèle pour la calibration et évaluation des dynamiques de LAI, biomasse et nombre de feuilles apparues

Calibration	Variétés			
	Fadda	Soumalemba	Soumba	Faourou
rMAE(LAI, N15-I + S16-P)	0,28	0,36	0,16	0,45
rMAE (Biom. Feuille)	0,32	0,62	0,28	0,20
rMAE (Biom. Tige)	0,30	0,41	0,09	0,16
rMAE(Biomasse)	0,20	0,25	0,14	0,16
rMAE (Nb. feuille)	0,04	0,08	0,05	0,05
Evaluation				
rMAE (LAI, N16-I+N15-P)	0,35	0,25	0,30	0,46
rMAE (Biom. Feuille)	0,30	1,13	0,40	0,39
rMAE (Biom. Tige)	0,29	0,21	0,65	0,36
rMAE (Biomasse)	0,24	0,42	0,65	0,34
rMAE (Nb. feuille)	0,04	0,08	0,05	0,06

Biom. Feuille : biomasse feuille, Biom. Tige : biomasse tige, Nb. feuille : Nombre de feuille, rMAE : (relative Mean Absolute Error) : Erreur absolue moyenne

3.4.1.3 Calibration et évaluation de la biomasse finale et rendement grain

Les figures 3.5 et 3.6 montrent le rendement biomasse et grain simulé et observé alors que le tableau 3.5 présente les coefficients de variation des rendements moyens grain et biomasse observés et les erreurs de prédiction du modèle (RMSE et NRMSE) pour les 4 variétés.

Rendement biomasse : la figure 3.5 montre les valeurs mesurées et simulées de biomasse pour les quatre variétés. CERES-Sorghum simule la biomasse avec un RMSE compris entre 717 et 2022 kg/ha soit un NRMSE de 10 à 30% en fonction des variétés. Les coefficients de variation (CV) des observations oscillent entre 5 et 44%. Exceptés pour Fadda en S16-P et Soumalemba en N16-I2 où le modèle surestime la biomasse finale et pour Faourou en N16-I où elle est sous-estimée, les valeurs prédites par le modèle sont comprises dans l'écart de variation des observations. Les valeurs de NRMSE sont inférieures à celles des CV pour l'ensemble des variétés. Le modèle prédit avec satisfaction la biomasse à la récolte (Tableau 3.5).

En ce qui concerne l'évaluation, les erreurs sur les valeurs simulées de biomasses (RMSE) varient de 190 à 3181 kg et les erreurs relatives (NRMSE) oscillent entre 5 et 38% alors que les écarts de variation des coefficients de variation (CV) varient de 11 à 62% (Tableau 3.5) en considérant toutes les variétés. Le modèle surestime Soumalemba en N16-I et S15-P et Soumba en N16-I (Figure 3.5). CERES-Sorghum rend compte avec satisfaction de la biomasse finale pour les 4 variétés avec des valeurs de l'erreur de prédiction comprises (ou en deçà) dans l'intervalle des coefficients de variation des observations.

Rendement grain : DSSAT-CSM-CERES-Sorghum simule les rendements grains avec un RMSE compris entre 293 à 592 kg/ha soit un NRMSE compris entre 14 et 38% en fonction des variétés. Les coefficients de variation des rendements mesurés varient entre 1 et 50 % (Tableau 3.5) en fonction des variétés.

Fadda : malgré une surestimation du rendement en N16-I2 et S16-P, CERES-Sorghum représente bien les rendements observés. Il prédit le rendement avec un NRMSE de 38%. L'erreur de prédiction est comprise dans l'erreur d'observation (CV : 11 à 41%). La prédiction du rendement grain pour Fadda est donc bonne.

Faourou : le modèle surestime le rendement de N16-I2. L'erreur de prédiction RMSE est de 889 kg. Cependant, cette erreur relative (57 %) est plus importante que l'erreur d'observation

(CV) comprise entre 11 et 29%. CERES-Sorghum montre donc une mauvaise qualité de l'ajustement du rendement grain observé et simulé pour Faourou. Le rendement grain observé a été très faible en N16-I2 (412 kg/ha) en raison de certains artéfacts (plus de détail dans la discussion). De ce fait, en enlevant la valeur de l'essai N16-I2, l'erreur de prédiction du modèle est de 293 kg soit 14%, ce qui est satisfaisant.

Soumalemba : CERES-Sorghum prédit les valeurs observées avec un RMSE (NRMSE) de 592 kg/ha (38%) qui est compris dans l'intervalle de l'erreur d'observation (23-50%). Le modèle montre une bonne qualité de l'ajustement du rendement grain observé et simulé.

Soumba : le rendement grain observé en S16-P est sous-estimé (explication dans la partie discussion). L'erreur relative de prédiction (26%) est plus élevée que le coefficient de variation des observations (24%). Cependant ces deux valeurs restent dans le même ordre de grandeur. La prédiction du rendement grain de Soumba peut être considérée satisfaisante.

Tableau 3.5 : Coefficients de performance du modèle pour la simulation du rendement grain et biomasse finale des différentes variétés

Variétés	Indices	Calibration		Evaluation	
		Grain	Biomasse	Grain	Biomasse
Fadda	RMSE (kg)	562	2022	732	2033
	NRMSE (%)	38	30	41	21
	CV (%)	11-41	5-43	27-54	11-62
Faourou	RMSE (kg)	889/293	1257	516	199
	NRMSE (%)	57/14 ^a	26	32	5
	CV (%)	1-29	12-24	51-62	21-52
Soumalemba	RMSE (kg)	592	1825	788/319	3181
	NRMSE (%)	38	19	80/27 ^b	38
	CV (%)	23-50	29-44	21-65	11-36
Soumba	RMSE (kg)	537	717	829	1468
	NRMSE (%)	26	10	66	27
	CV (%)	10-24	11-29	25-40	13-39

^aNMRSE calculé avec et sans la valeur de N16-I2 et ^bNRMSE calculé avec et sans la valeur de N15-P

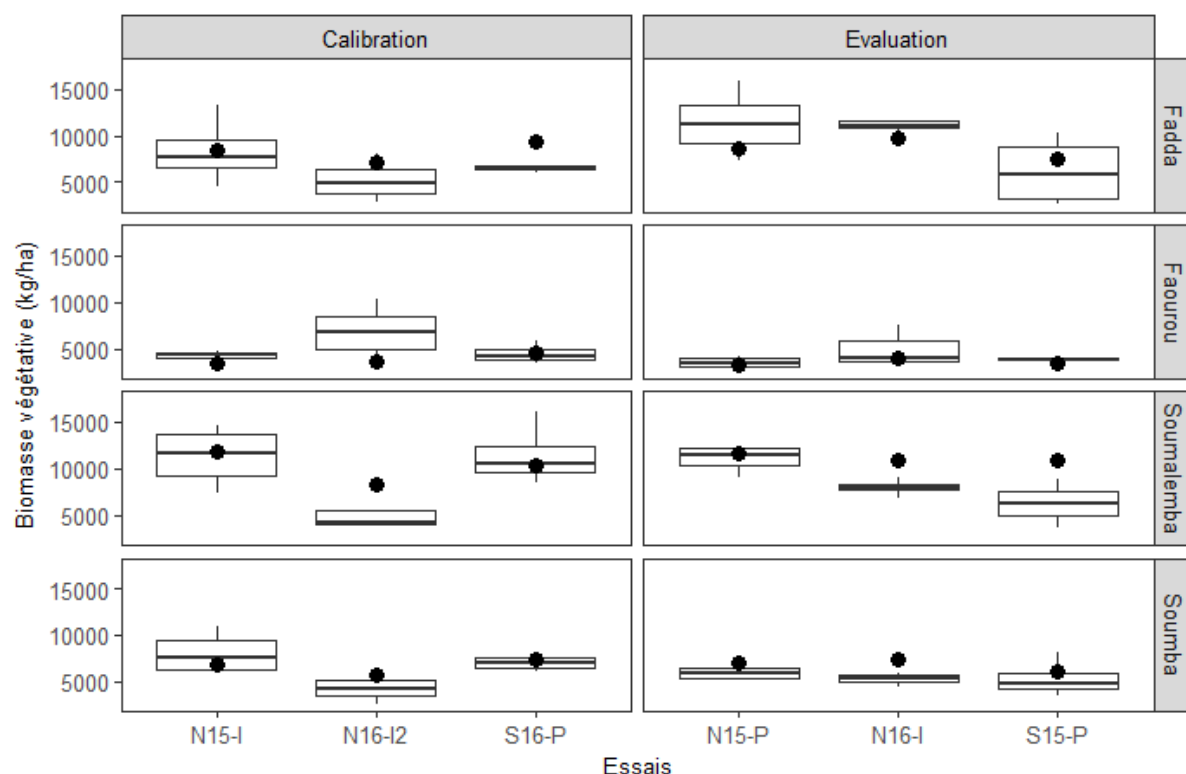


Figure 3.5 : Simulation de la biomasse finale de toutes les variétés en conditions optimales.

En boîtes de moustache, les observations et en points les simulations

Au niveau de l'évaluation, le rendement est bien simulé pour Fadda en N15-P et S15-P et surestimé en N16-I avec un NRMSE égal à 41%, inférieur au coefficient de variation. En ce qui concerne Faourou, le rendement grain est surestimé en S15-P. Cependant, l'erreur de prédiction (32%) est en accord avec les erreurs d'observation (51-62%). Le modèle donne pour Soumalembe une erreur de prédiction de 80 % qui est au-dessus de l'erreur d'observation. Cependant, l'erreur de prédiction est de 27% si l'on ne considère pas l'essai N15-P dont le rendement a été faible dû aux stressés abiotiques. L'erreur de prédiction dans ces conditions est comprise dans l'intervalle des erreurs d'observation obtenues (21-65%). Par ailleurs, le rendement grain est surestimé pour Soumba (N15-P, N16-I et S15-P) avec l'erreur de prédiction relative (66%) supérieure à l'erreur d'observation (25-40%). Le modèle simule mal les rendements de Soumba (Figure 3.6 et Tableau 3.5). Les raisons d'une prédiction avec un RMSE relativement élevé pour Soumba et Faourou sont abordées en discussion. Le rendement grain pour le site de N15-P est surestimé pour Soumalembe.

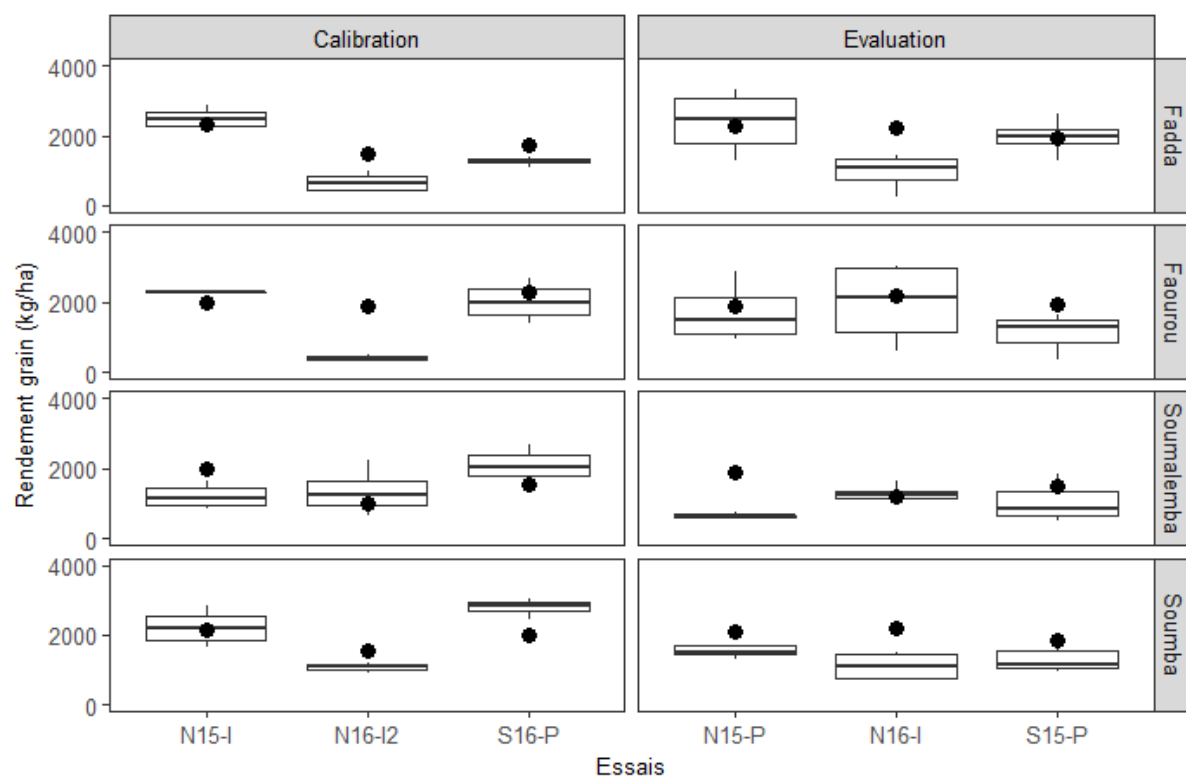


Figure 3.6 : Simulation du rendement grain de toutes les variétés en conditions optimales.

En boîtes de moustache, les observations et en points les simulations

3.4.2 Simulation de la biomasse finale et du rendement grain en conditions de stress azoté (T1, T3, T4 et T5) des quatre variétés dans les six environnements

Pour évaluer la réponse du modèle à différents modes d'application d'azote, nous avons d'abord évalué si le modèle pouvait reproduire une réduction de rendement en biomasse et en grain due à un apport d'azote réduit (Figure 3.7 a & b). La figure 3.7 montre qu'en condition de non-apport d'azote (T1), le modèle sous-estime la biomasse et le rendement grain final. Dans le cas d'un apport à 50% (T3), nous observons que de manière générale le rendement biomasse est correctement simulé, alors que pour le rendement grain, le modèle semble le surestimer (points pour T3 au-dessus de la ligne 1:1). En comparant T1 au traitement T2 (recommandation de la recherche) nous observons que le stress azoté est élevé en phase végétative comme reproductive (Figure 3.8). Dans le cas d'un apport de 50% de la recommandation (T3), les stress azotés sont aussi plus élevés que dans le cas du traitement T2, comme attendus. Cependant, il semble que même si l'effet du stress sur la biomasse est correctement simulé, son effet sur le rendement

grain est sous-estimé malgré un stress azoté élevé pendant la phase reproductive (Figure 3.7 et 3.8).

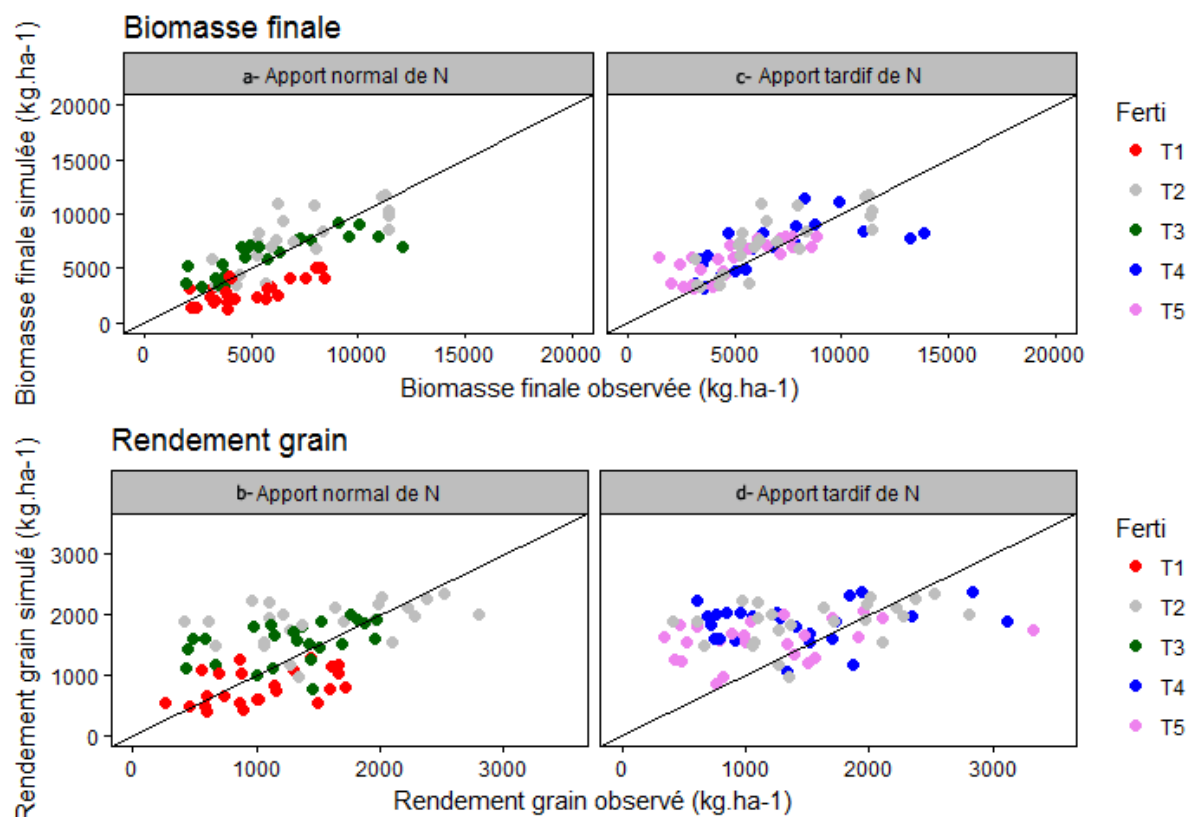


Figure 3.7 : Comparaison des rendements observés et simulés de biomasse et grain pour T1, T3, T4 et T5 des 4 variétés dans les 6 environnements

Dans un deuxième temps, nous avons évalué si le modèle pouvait rendre compte de l'effet d'un apport d'azote tardif sur l'accumulation de biomasse et le rendement grain (Figure 3.7 c & d). La figure 3.7c, montre que le modèle a bien simulé les rendements biomasse pour les deux traitements avec des apports tardifs d'azote (T4 et T5, bonne répartition des points sur la ligne 1:1). Par contre, au niveau du rendement grain, nous observons une claire surestimation de rendement pour les traitements T4 et T5 (Figure 3.7d). Lorsque, l'on examine les stress azotés en phase végétative et en phase reproductive (Figure 3.8), nous remarquons bien que le stress azoté pendant la phase végétative est plus important pour T4 comparé à T2, et T5 comparé à T3. De même, nous observons que le stress azoté pendant la phase reproductive est moindre pour les traitements avec des apports d'azote tardifs (T4 et T5, Figure 3.8) comme nous l'attendions. Ainsi, il semble que la dynamique de l'azote serait correctement simulée, mais que l'effet de l'azote sur l'accumulation de biomasse et de grain n'est pas correctement représenté.

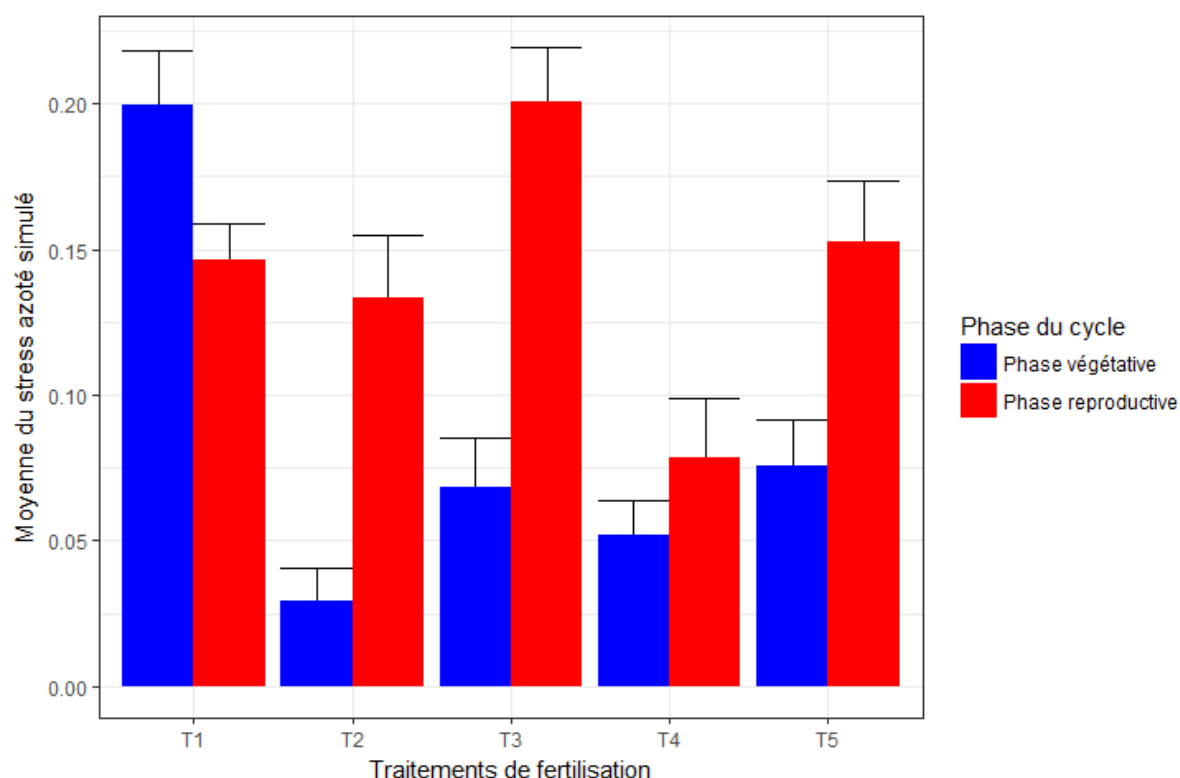


Figure 3.8 : Niveau du stress azoté simulé par le modèle pour les différentes modalités de fertilisation

3.5 Discussion

Les modèles de cultures sont des outils capables de reproduire la croissance et le développement des cultures dans différents environnements. Dans cette étude, le CSM-CERES-Sorghum du DSSAT a été utilisé pour appréhender les réponses du sorgho d’Afrique de l’Ouest à différentes options de gestion de la fertilisation azotée, en particulier de la fertilisation azotée tardive dans un souci d’optimisation de celle-ci dans le contexte de variabilité pluviométrique en Afrique Sub-Saharienne. Les résultats montrent que le CERES-Sorghum est capable de simuler la réduction de rendements biomasse et grain observés en conditions de stress azoté malgré une surestimation de la réduction dans le cas d’un non-apport d’azote et une sous-estimation de la réduction sur les grains dans le cas d’un apport azoté tardif (Figure 3.9).

3.5.1 Qualité des données d’expérimentation et de simulation

Dans cette étude, DSSAT-CERES-Sorghum simule les dates de floraison et de maturité des quatre variétés avec une erreur maximale respectivement de 9,3 jours (10%) et 9,6 jours (8%). Cependant, sur l’essai N16-I une carence en fer (jaunissement à blanchissement des feuilles) a été observée en début de culture, ce qui a retardé la date de floraison des variétés. Ainsi, les

dates de floraison pour cet essai ont été simulées avec 10 à 14 jours d'avance comparées aux observations, augmentant notre erreur globale de simulation.

Le modèle reproduit bien la dynamique de croissance en termes d'indice de surface foliaire (LAI), la biomasse au cours du cycle et le nombre de feuilles apparues (Figures 3.2, 3.3 et 3.4). Par contre, nous observons que le LAI de Faourou est sous-estimé et celui Soumalemba est surestimé (Figure 3.2), de même que la biomasse au cours du cycle a été surestimée en évaluation pour Soumalemba et Soumba (Figure 3.3). La sous-estimation est due au fait que le modèle sous-estime la date de floraison de Faourou en N16-I où en réalité l'expansion des feuilles continue au-delà de la date de floraison simulée. La surestimation est probablement due au mauvais développement des plants lié à la carence en fer mentionné plus haut ainsi qu'au rougissement des feuilles en 2015 ayant limité le développement potentiel des plants.

Par ailleurs, la répartition de la matière sèche entre la biomasse tige et la biomasse feuille est mal simulée. En effet, la biomasse feuille est surestimée. Les biomasses totale, tige et feuille sont des traits complexes affectés par pratiquement toutes les variables environnementales prises en compte dans le modèle (Lopez *et al.*, 2017) rendant difficile la répartition de la matière sèche. Pour résoudre ce problème, ces auteurs ont implémenté dans leur modèle deux nouvelles équations (taux de croissance de la tige et poids spécifique des feuilles) sur la répartition de la matière sèche en tige et feuille comme fonction linéaire du temps thermal. Cette faiblesse du modèle dans la répartition de la biomasse aérienne a été aussi rapportée par Grossi *et al.* (2013) et White *et al.* (2007). En général, DSSAT-CSM-CERES-Sorghum a été suffisamment précis dans la simulation du développement et de la croissance des quatre variétés dans les différents environnements de l'étude. Ce résultat confirme ceux antérieurs de MacCarthy *et al.* (2010), Amouzou *et al.* (2018) et Adam *et al.* (2018) dans la capacité du modèle à simuler le développement et la croissance des variétés de sorgho typiques de l'Afrique de l'Ouest dans différentes conditions environnementales.

DSSAT-CSM-CERES-Sorghum simule le rendement en grain avec des NRMSE qui sont compris dans la variation des erreurs d'observations excepté pour Soumba en calibration (RMSE = 26% vs. 24%) et évaluation (66% vs 44%), Faourou en calibration (57% vs 29%) et Soumalemba en évaluation (80% vs 65%). La relative valeur élevée des erreurs de prédiction du modèle pour le grain de ces variétés serait due aux faibles rendements obtenus. En effet, les expérimentations dans leur ensemble ont connu des stress abiotiques et biotiques non simulés par le modèle. Par exemple, les variétés caudatum (Faourou et Soumba) ont particulièrement

souffert de carences en fer sur l'essai N16-I, ce qui explique la surestimation de leur rendement en grain (et biomasse) sur cet essai. Aussi, les fortes pluies enregistrées (>75 mm/jour sur sol sableux) en particulier à Nioro du Rip occasionnant l'ensablement de l'essai N16-I2 malgré la mise en place de diguettes ont entraîné de fortes pertes, et expliquent la surestimation par le modèle des rendements grain de toutes les variétés, exceptés la variété à cycle long. Enfin, des stress biotiques telles les maladies de feuilles en 2015 traduit par de sévères attaques aussi bien à Nioro du Rip (N15-P et N15-I) qu'à Sinthiou Malème (S15-P) ont été notés, ce qui a engendré des pertes de rendements (biomasse et grain) et une grande variation des rendements moyens.

Tenant compte des artefacts (ensablement et lessivage pour Faourou en N16-I2 et sévérité du rougissement des feuilles et un stress hydrique en fin de culture dus au long cycle pour Soumalembe en N15-P), les erreurs de prédiction du modèle diminuent à 14 et 27% respectivement pour Faourou en calibration et Soumalembe en évaluation. Ces erreurs sont dès lors comprises dans l'intervalle des erreurs d'observation sur ces deux variétés. Le NRMSE élevé de Soumba en calibration par rapport à l'erreur d'observation s'expliquerait par la sous-estimation du rendement grain en S16-P (Figure 3.6) consécutive à des simulations de stress hydrique et azoté en fin de cycle au moment du remplissage des grains. Bien que cet essai ait reçu moins d'eau, le sol est resté suffisamment humide grâce à sa texture limono-sableuse. La faible valeur du rendement grain simulé en S16-P serait due au stress azoté, alors qu'en évaluation le NRMSE élevé comparé au CV s'expliquerait par la surestimation des rendements (faibles) observés en S15-P et N16-I liés aux raisons évoquées plus haut. Néanmoins, les prédictions de biomasse finale et du grain par le modèle peuvent être considérées comme satisfaisantes.

3.5.2 Faiblesses et pistes d'amélioration de DSSAT-CSM-CERES-Sorghum dans la simulation de réduction de rendements liée à un stress azoté

Les simulations de la réponse du sorgho à différentes fertilisations azotées (doses et dates d'application) montrent que le modèle sous-estime la biomasse et le rendement grain sous le traitement témoin sans fertilisation (T1, Figure 3.7a et b). Ce faible rendement simulé pourrait être dû au fort stress azoté simulé en T1 (Figure 3.8). Le fort stress azoté simulé est peut-être dû au fait que DSSAT-CSM-CERES-Sorghum ne prend pas en compte la minéralisation de N liée aux activités microbiennes (activités biologiques) ou les dépôts atmosphériques de N dans les systèmes à faibles intrants. En effet, le modèle simule pour nos essais une minéralisation variant de 32,7 à 73,5 kg/ha selon les environnements alors que Bernhard-reversat (1977) rapporte une minéralisation *in situ* de 39,5 à 75,3 kg/ha sur un sol ferrugineux peu lessivé en

savane sahélienne au Sénégal entre juin et novembre (saison de culture). Le modèle simule une valeur inférieure faible comparée à celle observée par Bernhard-reversat (1977). Il semble donc que le stress azoté pendant la phase végétative soit trop accentué lorsque l'on attend un stress azoté important (T1). Par contre, si le stress azoté attendu est moindre (T3), alors le modèle reproduit la réduction de rendement due à un stress azoté en relation avec une diminution de la dose de N (T3). Cependant, l'effet du stress sur les grains reste moins important comparé aux valeurs observées, d'où une sur estimation des rendements. Cela pourrait être dû à une sous-estimation du niveau de stress pendant la phase reproductive (Figure 3.8) ou une sous-estimation de son effet sur le rendement grain.

Par ailleurs, DSSAT-CSM-CERES-Sorghum simule bien le rendement biomasse pour les deux traitements à apports tardifs d'azote (T4 et T5) mais surestime leurs rendements grains (Figure 3.7c et d). En analysant, la réduction de rendements biomasse et grain de T4 et T5 comparée à T2, il apparaît que cette réduction est bien reproduite par le modèle. Cependant, elle reste moins prononcée sur les rendements grains des traitements ayant reçu la même dose d'engrais mais à différentes dates (apport tardif), ce qui n'est pas le cas en observation (Figure 3.9). Ces résultats indiquent que malgré une bonne prédiction de la biomasse de ces traitements, l'effet du stress sur les grains dans le cadre d'un apport tardif n'a pas été important ou suffisant. Il semblerait que lors d'un apport tardif d'azote, le stress végétatif est bien accentué mais que pendant la phase reproductive le stress azoté est trop atténué. Ainsi, le stress azoté pendant la phase végétative n'aurait pas de conséquence sur le stress azoté pendant la phase reproductive. Grâce à l'apport d'azote tardif, la concentration en azote dans les parties végétatives revient à un optimum et donc le stress azoté en phase reproductive est similaire pour les traitements en apport tardif ou non (Figure 3.10). Dans nos expérimentations, il semblerait que cela ne soit pas le cas, et que l'on observe bien une réduction de rendement malgré l'apport tardif d'azote (Figure 3.9).

Ces différents comportements du modèle suggèrent plusieurs améliorations. Ainsi, une réduction de la réponse de l'effet du stress sur le processus de photosynthèse pendant la phase végétative (NDEF1) permettrait de mieux simuler un stress pendant la phase végétative plus important (notamment pour T1) et un ajustement du stress azoté pendant la phase reproductive (NDEF2) permettrait de prendre en compte un stress plus important sur les rendements grains lors d'un apport tardif d'azote.

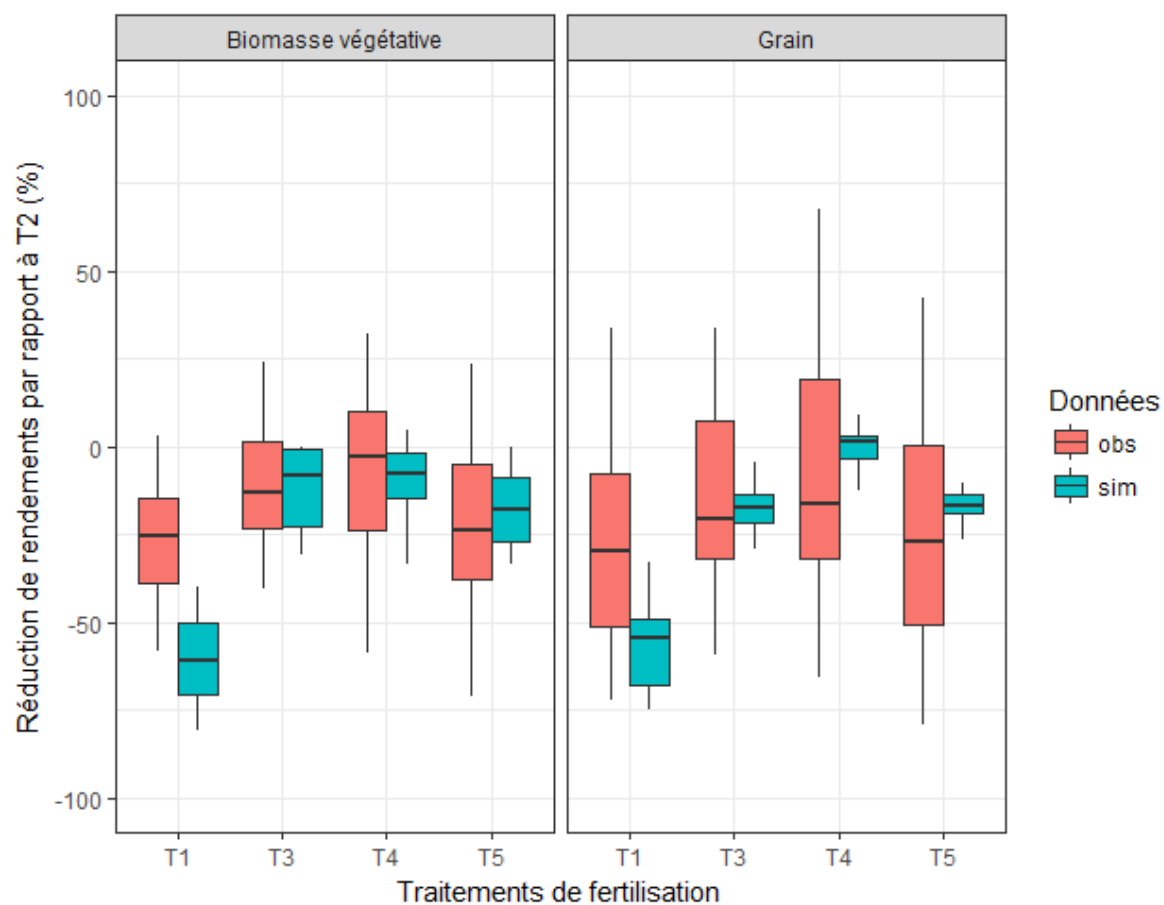


Figure 3.9 : Réduction de rendements biomasse et grain en cas de stress azoté (T1-3-4-5) comparé au rendement du niveau de stress minimal (T2).

obs : observées et sim : simulées

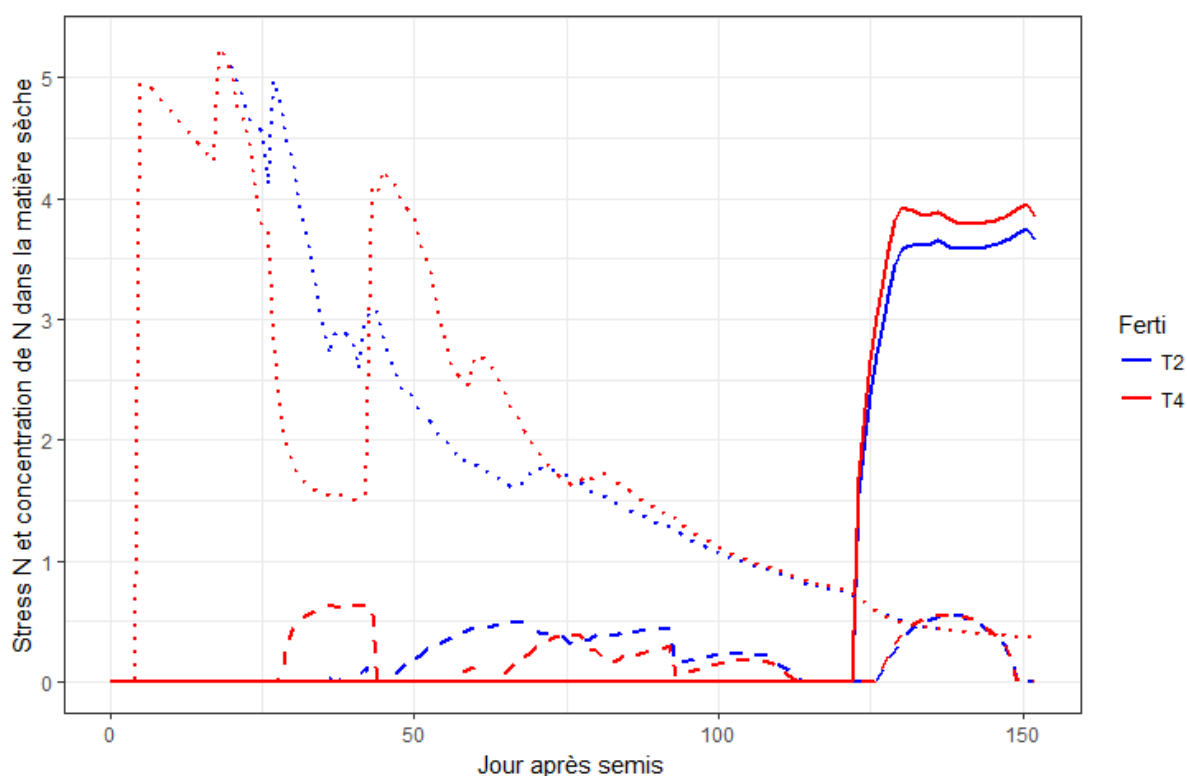


Figure 3.10 : Exemple de stress azoté et concentration d’azote dans la biomasse végétative et grain simulés pour Soumalemba.

En tiret, le facteur de stress azoté ; en pointillé, la concentration de N dans les feuilles et tiges et en trait plein, la concentration de N dans les graines.

3.6 Conclusion

Le modèle CSM-CERES-Sorghum du DSSAT a bien simulé la phénologie, l’indice de surface foliaire, la biomasse végétative et le rendement grain dans les conditions optimales d’apport d’engrais et d’humidité. Son usage dans la simulation des différents stress azotés montre que (i) la différence de rendement est simulée pour le stress azoté de début de saison mais, le stress est trop important avec l’apport de 0% de N comparé à l’observation ; (ii) le modèle simule bien le stress et l’effet du stress sur la biomasse et le grain pour une fertilisation réduite mais apportée aux mêmes dates que la recommandation de la recherche (T3) ; (iii) le modèle ne reproduit pas correctement le stress lié aux dates tardives d’application de N (pratique recommandée vs. apport tardif) en termes de rendement grain, mais le reproduit correctement en termes de rendement biomasse. Il ne simule pas assez d’une part, les différences de rendement grain entre 100% de N en apport normal (T2) et 100% de N en apport tardif (T4) et d’autre part entre 50% de N en apport normal (T3) et 50% de N en apport tardif (T5) alors qu’il rend bien compte de

la différence due à un apport tardif pour la biomasse finale. Le modèle a été plus précis dans la simulation de la biomasse finale que les grains. Une réduction de l'effet du stress azoté sur la photosynthèse et un ajustement du stress N en phase reproductive sont requis pour une meilleure simulation du rendement grain en cas d'apport tardif.

Chapitre 4 : Application de DSSAT-CSM-CERES-Sorghum pour définir les fenêtres de dates de fertilisation pour un début de saison déficitaire : Cas de Nioro du Rip et Sinthiou Malème au Sénégal

4.1 Résumé

Maintenir ou obtenir un rendement élevé dans un contexte de variabilité pluviométrique requiert des dates de fertilisation qui profitent de l'humidité du sol en fonction des pluies reçues. Le DSSAT-CSM-CERES-Sorghum a été utilisé pour définir, en cas de début de saison déficitaire, les dates de fertilisation optimales pour trois variétés de sorgho (Faourou, Fadda, Soumalemba) à maturité contrastée. Les données climatiques journalières historiques de 1950 – 2016 ont été utilisées pour une analyse saisonnière considérant les localités de Nioro du Rip et Sinthiou Malème (Sénégal) aux conditions environnementales différentes (sol et climat). Il est observé une grande variabilité interannuelle des rendements (biomasse et grain). Les simulations avec différentes dates d'application d'engrais ont permis de montrer qu'avec une application tardive il n'y a pas de perte de rendements, voire un gain, pour des années avec un début de saison déficitaire. Le décalage de la première date de fertilisation permet de ne pas perdre de biomasse ou de grain avec une fertilisation jusqu'à 34 jour après le semis (jas) comparé au rendement de la date de fertilisation recommandée (première application au semis ou levée). La première application de la fertilisation tardive en cas de début de saison déficitaire devra se faire entre le tallage et la montaison pour les variétés à maturité précoce (85 à 95 jours) et intermédiaire (105 à 135 jours) et au tallage pour les variétés à maturité tardive (+ de 135 jours). La fertilisation tardive réduit le lessivage de l'azote.

Mots clés : Sorgho, dates de fertilisation, début de saison de pluies, DSSAT-CSM-CERES-Sorghum, Nioro du Rip, Sinthiou Malème

4.2 Introduction

Quatrième céréale cultivée au Sénégal après le mil, le riz et le maïs, la production nationale du sorgho (*Sorghum bicolor* L.) est très variable d'une année à une autre (ANSD, 2016, 2018). Les zones où le sorgho est actuellement cultivé en saison de pluie connaissent une perturbation du climat en termes d'élévation des températures, de variation des régimes de précipitations et d'augmentation de la fréquence des phénomènes météorologiques extrêmes (IPCC, 2007, 2014).

En Afrique Sub-Saharienne (ASS) où la pluviométrie est très variable (Graef et Haigis, 2001; Ali *et al.*, 2008), les ressources en eau limitées (Falkenmark, 1989; Valipour, 2015) et où les sols s'appauvrissent davantage (Sanchez *et al.*, 1997; Bationo *et al.*, 2003; Giller *et al.*, 2011; Kibunja *et al.*, 2011), la fertilisation est très importante dans la gestion des cultures parce qu'elle peut bonifier l'effet de l'humidité du sol ou accentuer l'effet du déficit hydrique. En effet, il existe une synergie entre l'engrais azoté et l'eau pour leurs effets sur les rendements de cultures (Prihar *et al.*, 2000). Une bonne gestion des dates de fertilisation en se basant sur la distribution des pluies qui vont affecter l'humidité du sol est essentielle pour obtenir des rendements élevés et de profits.

La détermination des dates optimales de fertilisation nécessite des expériences de terrain à long terme et très coûteuses. Cependant, il est concrètement impossible de tester toutes les interactions possibles entre les dates d'apports d'engrais, le sol et la répartition des pluies afin d'évaluer les effets des variabilités interannuelles couplées à différentes dates d'apports d'engrais sur les rendements. Les techniques de simulation fournissent un cadre pour soutenir la recherche à cette fin. L'application de l'analyse des systèmes qui combine à la fois la recherche expérimentale sur le terrain et la modélisation des cultures pour déterminer les pratiques agricoles optimales dans différents pays ou régions est devenue courante (Rani *et al.*, 2014). Ainsi, les modèles de cultures une fois calibrés et validés avec les données expérimentales peuvent aider à définir les pratiques culturales optimales en prenant en compte les multiples interactions entre le sol, le climat, les variétés et la gestion des cultures.

CSM-CERES-Sorghum du « Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT) » a été calibré et validé dans un premier temps dans les conditions optimales (stress minimal en nutriments et eau) puis utilisé pour évaluer les réponses du sorgho dans les différentes conditions de stress azoté. Il simule les réponses dans les différentes conditions avec satisfaction (chapitre 3), une bonne base pour l'exploration des dates de fertilisation optimales.

Les études de modélisation sur le sorgho, en l'occurrence l'optimisation des pratiques agricoles au Sénégal sont rares ou inexistantes. La définition d'une fenêtre de fertilisation est une approche intéressante pour identifier les périodes appropriées afin d'assurer le succès des cultures en conditions pluviales en particulier dans les conditions d'eau limitées en zones soudano-sahéliennes du Sénégal.

Ce travail propose donc une application du modèle DSSAT-CSM-CERES-Sorghum sous des régimes climatiques et dates de fertilisation variables. L'objectif est de définir les dates de fertilisation optimales pour un début de saison tardif ou déficitaire de trois variétés de sorgho (à maturité contrastée) dans deux conditions environnementales différentes (sol et climat) en utilisant les données climatiques journalières historiques de 1950 – 2016.

4.3 Matériel et méthodes

4.3.1 Configuration des simulations

Dans le cadre de cette étude, nous avons choisi comme référence 2 des expérimentations conduites pour cette thèse (chapitre 2). Ces deux expérimentations sont respectivement Nioro du Rip en 2015 (N15-P) et Sinthiou Malème en 2016 (S16-P) sous conditions pluviales (chapitre 2). Les deux essais ont été choisis du fait de leur conduite en conditions pluviales, du niveau des rendements grains obtenus et du contraste de leur sol. Nous les avons utilisés comme référence pour définir les sols et itinéraires culturaux de nos simulations (date et densité de semis). A Nioro du Rip, le semis a été effectué sur un sol sableux à plus de 90% de sable ; la teneur en d'azote total (N) est de 0,052% et 1,05 % de matière organique (MO) sur les 30 premiers centimètres de l'horizon. A Sinthiou Malème, le semis a été effectué sur un sol limono-sableux dont la teneur en sable est de 83%, la teneur en N est de 0,049% et 1,06% de MO. Le matériel végétal retenu pour tester les réponses aux différentes dates d'apport est constitué de trois variétés de sorgho à savoir Faourou (cycle court, 85-95 jours), Fadda (cycle moyen, 105-135 jours) et Soumalemba (cycle long, >135 jours) afin de tenir compte des variations du cycle de culture (sensibilité à la photopériode). La variété Soumba n'a pas été retenue du fait qu'elle ne réponde mieux à la fertilisation tardive en expérimentation comparée aux 3 autres variétés (chapitre 2) et aussi du fait qu'elle soit de cycle moyen déjà considéré à travers la variété Fadda. La densité de 31 250 poquets à l'hectare avec deux plants par poquets soit 62 500 plants à l'hectare a été appliquée ; la date de semis est fixée au 2 juillet à Nioro du Rip et 10 juillet à Sinthiou Malème. Les applications d'engrais sont différentes entre la recommandation (R) et les dates tardives explorées (L). La fertilisation recommandée par la

recherche est faite en 3 périodes à savoir à la levée, au tallage et à la montaison alors que les modalités testées pour une fertilisation tardive sont faites en 2 apports avec la suppression de l'apport à la levée. Le premier apport tardif est fait à la montaison en combinant les doses à appliquer à la levée et au tallage et le deuxième est fait à l'épiaison.

A cela, nous avons associé des séries de données climatiques historiques pour ces 2 sites. Elles proviennent de la base de données climatiques de ISRA-CERAAS (période de 1954 à 2016) et de Agrhymet-IRD (période de 1950 à 1953) et sont constituées de données journalières de pluie, d'humidité relative, de températures minimale et maximale, d'insolation et de vitesse du vent de 1950 à 2016 (67 ans).

4.3.2. Analyse de scénario

Des deux doses d'engrais étudiées (50 et 100%) dans le chapitre 2, la dose 100% a été considérée pour l'exploration des dates de fertilisation car ayant donné plus de gain de rendement que la dose 50% (Figure 2.6 chapitre 2). Différentes modalités ont été testées en fonction des dates de semis et du cycle de la variété. Seize (16) modalités de fertilisation ont été évaluées pour Soumalembe, 12 pour Faourou et Fadda à Nioro du Rip, et 8 modalités pour les 3 variétés à Sinthiou Malème. Elles sont définies en considérant des pas de temps de 5 jours (avant et après) à partir des dates de fertilisation tardive (L) appliquées en expérimentation pour chaque variété. Ces dates ont été ensuite évaluées en nombre de jours après le premier apport de la recommandation (T2, R dans Tableau 4.1) qui est effectué à la levée soit 8 jours après semis (Tableau 4.1).

Tableau 4.1 : Dates de fertilisation testées

Modalités ^a		Définition des modalités de dates de fertilisation	Variétés					
			Faourou		Fadda		Soumalemba	
			NR (jal)	SM (jal)	NR (jal)	SM (jal)	NR (jal)	SM (jal)
1	R	Apport 100% d'engrais à la levée, tallage et montaison (T2)	0	0	0	0	0	0
2	L-55j	Apport d'engrais 55 jours plus tôt que L					16	
3	L-50j	Apport d'engrais 50 jours plus tôt que L					21	
4	L-45j	Apport d'engrais 45 jours plus tôt que L					26	
5	L- 40j	Apport d'engrais 40 jours plus tôt que L					31	
6	L- 35j	Apport d'engrais 35 jours plus tôt que L	10		10		36	
7	L- 30j	Apport d'engrais 30 jours plus tôt que L	15		15		41	
8	L-25j	Apport d'engrais 25 jours plus tôt que L	20		20		46	
9	L- 20j	Apport d'engrais 20 jours plus tôt que L	25		25		51	
10	L-15j	Apport d'engrais 15 jours plus tôt que L	30	6	30	9	56	16
11	L-10j	Apport d'engrais 10 jours plus tôt que L	35	11	35	14	61	21
12	L-5j	Apport d'engrais 5 jours plus tôt que L	40	16	40	19	66	26
13	L	Apport 100% d'engrais à la montaison et à l'épiaison (T4)	45	21	45	24	71	31
14	L+5j	Apport d'engrais 5 jours plus tard que L	50	26	50	29	76	36
15	L+10j	Apport d'engrais 10 jours plus tard que L	55	31	55	34	81	41
16	L+15j	Apport d'engrais 15 jours plus tard que L	60	36	60	39	86	46

^a varie en fonction de la longueur du cycle la variété et de la date de semis ou site, NR : Nioro du Rip , SM : Sinthiou Malème, jal : jour après levée, 0 date de la levée

4.3.3 Analyses de données

4.3.3.1 Caractérisation de la pluviométrie

Les deux sites ont été caractérisés en termes de nombre d'années humides, normales et sèches de même que par les sécheresses de début de saison culturale. La pluviométrie d'une année dans ce travail est celle d'une saison de culture c'est-à-dire du mois de juin à novembre (Pa). La durée de début de saison culturale est appréciée en fonction des sites, soit 30 et 20 jours respectivement pour Nioro du Rip et Sinthiou Malème. Ceci correspond à l'écart de jours entre le premier (stade levée) et deuxième (stade tallage) apports de la recommandation (T2).

Il existe plusieurs méthodes de calcul d'une année sèche, normale et d'une année humide (soit par rapport aux quantiles, soit par rapport aux écarts types, soit en pourcentage par rapport à la médiane ou moyenne). Pour cette étude, nous avons choisi la méthode d'écart à la moyenne de la série considérée utilisée par Hirche *et al.* (2007). Une année sera considérée comme normale si l'écart ne dépasse pas 10% de la moyenne sur l'ensemble des années étudiées. Elle sera sèche si la valeur est en deçà de 10 % et humide au-delà.

Pour caractériser la sécheresse saisonnière de début de culture, nous avons considéré le déficit pluviométrique saisonnier (équations 4.1 et 4.2, Coughlan, 1987). Il est calculé comme suit :

$$(4.1) \quad \text{SDPs} = \text{SDPa} * F$$

$$(4.2) \quad F = \frac{P_s}{P_a}$$

où le seuil de déficit pluviométrique annuel (SDPa) est la valeur en deçà de laquelle une année est qualifiée de « sèche » (0,9Pa), pondéré par la fraction (F) de la moyenne pluviométrique considérée sur la durée du début de saison (Ps) et de la moyenne pluviométrique annuelle (Pa).

4.3.3.2 Détermination de fenêtres d'application d'engrais appropriées

Les moyennes de rendements simulés par DSSAT-CSM-CERES-Sorghum et leur variance ont été calculées pour chaque date de fertilisation d'une variété donnée sur les 67 ans afin de déterminer globalement les dates de fertilisation à rendements plus stables. Pour définir la ou les fenêtre (s) d'application optimales des engrais (azote), les pertes ou gains moyens de rendements simulés pour chaque variété à chacune des dates de fertilisation ont été déterminés selon le type d'année et le début de saison de culture, comparé à la date de fertilisation

recommandée par la recherche (première application à la levée). L'estimation de perte ou gain de rendement a été calculé suivant la formule :

$$(4.3) \quad r_t = \left(\frac{Y_{tjk} - Y_{Rjk}}{Y_{Rjk}} \right) \times 100$$

Où r_t est le pourcentage de réduction ou gain de rendements biomasse ou grain par rapport à la recommandation pour la date d'application t , Y_{tjk} est le rendement de la date d'application t de la variété j pour l'année k et Y_{Rjk} est le rendement de la date de fertilisation recommandée (R) pour la variété j pour l'année k .

Dans cette étude, le choix de dates est fait en se basant sur la double production (biomasse et grain) vu que le Sénégal est un pays agro-pastoral et en ne prenant aucun risque de réduction par rapport à une fertilisation appliquée comme recommandée par la recherche agricole nationale.

4.3.3.3 Utilisation de N selon les dates de fertilisation

La variation d'azote prélevé (N prélevé) et d'azote lessivé (N lessivé) pour chaque modalité de dates fertilisation d'une variété donnée dans un site donné sur les 67 ans ont été représentée en boîte à moustache puis commentée.

4.4 Résultats

4.4.1 Caractéristiques climatiques

La pluviosité moyenne de la saison de culture calculée sur la série de 1950 à 2016 pour les deux sites donne des valeurs proches pour Nioro du Rip et Sinthiou Malème (785 et 747 mm). Les variabilités interannuelles (coefficient de variation) sont sensiblement identiques pour les deux sites (Tableau 4.2).

Il ressort de l'analyse de la figure 4.1 une alternance d'années humides et sèches avec des séquences de durées variables. A Nioro du Rip, les séquences d'années humides et sèches ne dépassent pas respectivement six (6) et quatre (4) années successives alors qu'à Sinthiou Malème, les périodes humides ne dépassent pas trois (3) ans successifs après 1970. La longue période d'années humides est enregistrée avant 1970 pour les deux sites, 1950 - 1955 à Nioro du Rip et 1963 – 1968 à Sinthiou Malème (Figure 4.1). Le nombre d'années humides est identique pour les deux sites alors que celui des années sèches et normales est relativement différent (Tableau 4.2). Le nombre d'années sèches est plus important que le nombre d'années

normales à Sinthiou Malème (Tableau 4.2). Sur les deux dernières décennies (1997-2016), Sinthiou Malème semble particulièrement être touché par un déficit pluviométrique (plus d'années sèches).

Le type de début de saison est indépendant du cumul de pluie dans la saison. Ainsi, des années humides ou normales ont connu un début de saison déficitaire ou des années sèches ont été normales au début de la saison de culture (Figure 4.1). En effet, 20% des années à pluviométrie normale à excédentaire (années normales et humides) à Nioro du Rip ont connu un début de saison déficitaire malgré un cumul au-dessus du seuil de déficit pluviométrique annuel (SDPa) tandis qu'à Sinthiou Malème, 41% des années à pluviométrie normale à excédentaire ont connu un déficit hydrique en début de saison. A l'inverse, 13 et 43% des années à pluviométrie déficitaire (années sèches) respectivement à Nioro du Rip et à Sinthiou Malème ont connu un début de saison normal (cumul au-dessus du seuil de déficit pluviométrique saisonnier, SDPs) (Tableau 4.2). De manière générale, Sinthiou Malème apparaît donc comme un site ayant une tendance plus sèche que Nioro du Rip, avec plus d'années sèches et plus de début de saison avec un déficit de pluviométrie.

Tableau 4.2 : Paramètres statistiques des séries pluviométriques de chaque site

Paramètres	Nioro du Rip	Sinthiou Malème
Pluviométrie moyenne annuelle (Pa, mm)*	785	747
Ecart type	203	181
Minimum	410	387
Maximum	1311	1278
Coefficient de variation (%)	26	24
Nombre d'années humides	24	24
Nombre d'années humides à début de saison normal	20	14
Nombre d'années humides à début de saison déficitaire	4	10
Nombre d'années normales	20	15
Nombre d'années normales à début de saison normal	15	9
Nombre d'années normales à début de saison déficitaire	5	6
Nombre d'années sèches	23	28
Nombre d'années sèches à début de saison normal	3	12
Nombre d'années sèches à début de saison déficitaire	20	16

Paramètres	Nioro Rip	du Sinthiou Malème
Seuil de Déficit Pluviométrique annuel (SDPa, mm)	706	672
Pluviométrie moyenne de la saison considérée (saison équivalent à la durée du début de saison culturale, Ps en mm)	209	137
Seuil de Déficit Pluviométrique de la saison (SDPs, mm)	188	123

*Pluviométrie moyenne annuelle = Pluviométrie moyenne de juin à novembre (saison de culture)

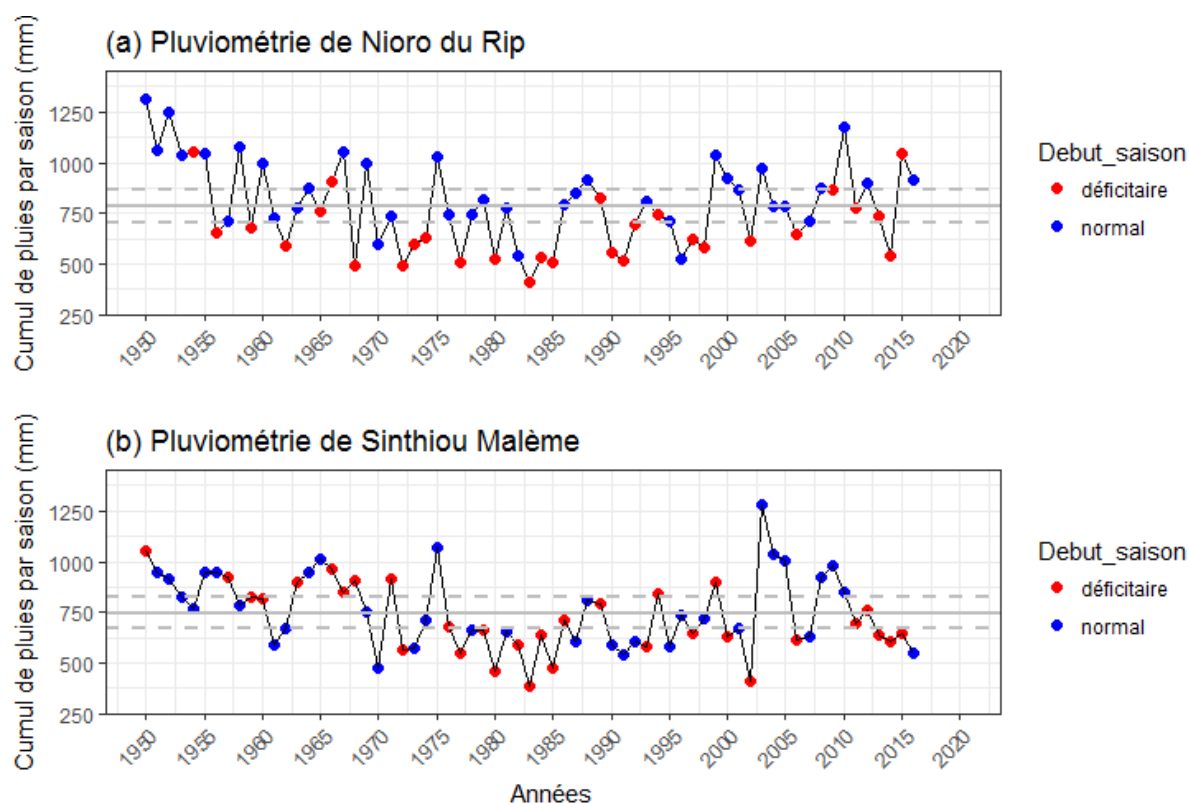


Figure 4.1 : Cumul pluviométrique annuel de 1950 à 2016 à Nioro du Rip et Sinthiou Malème

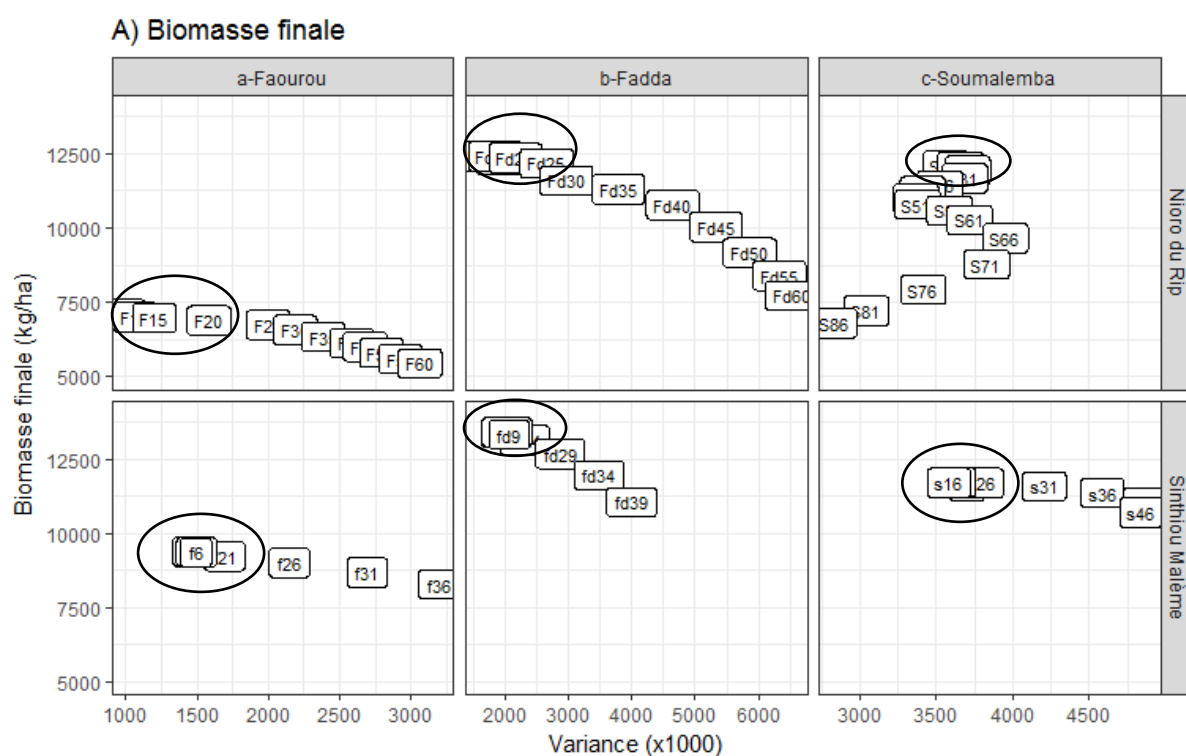
En trait gris plein la moyenne de la série, en tiret gris la moyenne \pm 10%

4.4.2 Analyse des variabilités saisonnières de la biomasse finale et du rendement grain

4.4.2.1 Dates de fertilisation optimales sur la base de la stabilité des rendements

En analysant les sorties du modèle, on observe d'une part des niveaux de rendements simulés compris dans l'intervalle des rendements potentiels des variétés considérées (Fadda : 2000-3500kg/ha, Faourou : 2500-3000kg/ha et Soumalemba 800-1300kg/ha). D'autre part, il est observé une grande variabilité interannuelle (par exemple la variance du rendement en grains est de 100 000 à 300 000, 150 000 à 300 000 et 70 000 à 120 000 respectivement pour Faourou, Fadda et Soumalemba) et une variabilité liée aux dates d'application aussi bien pour la biomasse finale que pour le rendement grain de toutes les variétés sur les deux sites exceptés les

rendements grains de Soumalemba à Sinthiou Malème qui semblent identiques quelle que soit la date de fertilisation mais à variances variables. Plus la date de fertilisation est retardée, plus le niveau de rendements biomasse et grain est faible (par exemple pertes de biomasse et grain respectives de 38 et 24% pour Fadda à Nioro du Rip) et instable exceptés pour les rendements grains de Soumalemba à Nioro du Rip (Figure 4.2). Se basant sur la stabilité des rendements (i.e. variance), lorsque l'objectif de production est la biomasse, on peut retarder la fertilisation jusqu'à 20 et 25 jours après la levée pour une variété à cycle court (Faourou, 85-95 jours) et cycle moyen (Fadda, 105-135 jours) respectivement et indépendamment de la localité, jusqu'à 31 et 26 jours respectivement à Nioro du Rip et Sinthiou Malème pour une variété à cycle long (Soumalemba, >135 jours) (Figure 4.2-A). Pour un objectif de production de grain, la fertilisation peut être retardée jusqu'à 20 jours après la levée à Nioro du Rip et 26 jours à Sinthiou Malème pour une variété à cycle court, jusqu'à 35 et 29 jours respectivement à Nioro du Rip et Sinthiou Malème pour une variété à cycle moyen et de 61-86 jours à Nioro du Rip et jusqu'à 46 jours à Sinthiou Malème pour une variété à cycle long (Figure 4.2-B).



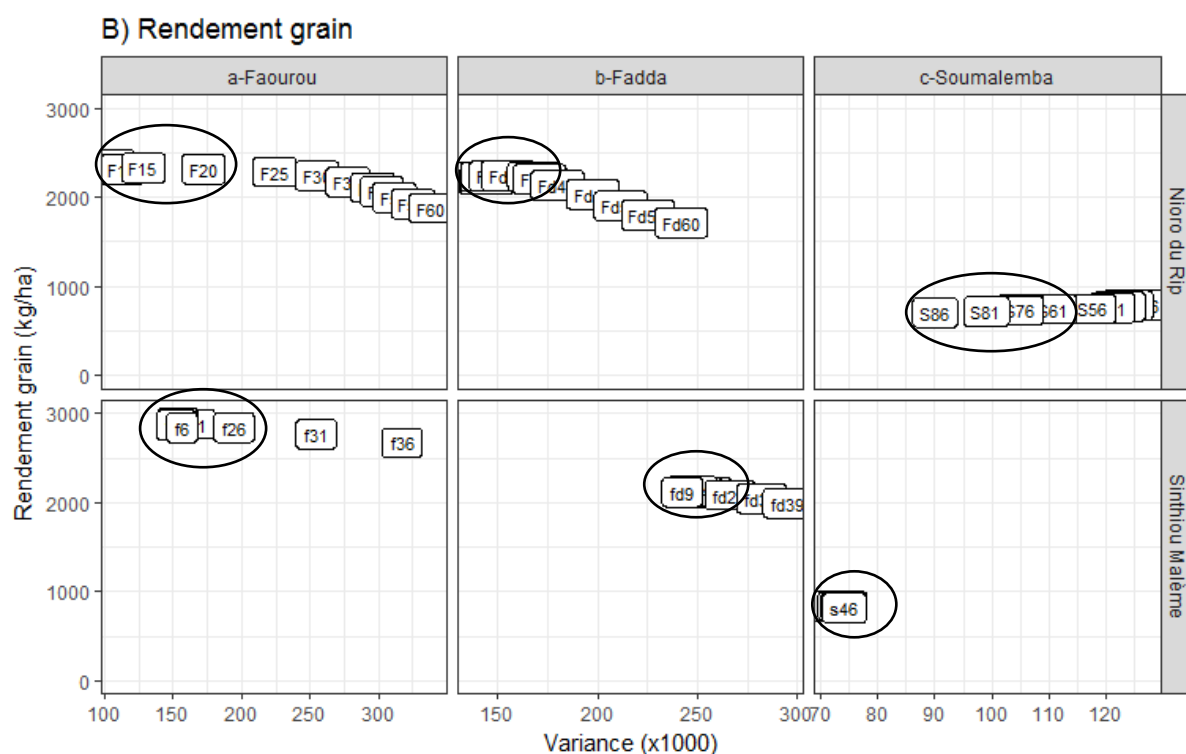


Figure 4.2 : Rendements et variance associée à la biomasse finale (A) et au grain (B) moyens pour les différentes dates de fertilisation et variétés à Nioro du Rip et Sinthiou Malème

L'échelle de l'axe x (variance) diffère d'une variété à l'autre. Les chiffres sur les étiquettes correspondent à la date d'application d'azote. Jour 0 correspond à la date de levée, modalité R, L= 45 et 21 jours pour Faourou, L= 45 et 24 jours pour Fadda et L= 71 et 31 jours pour Soumalemba respectivement à Nioro du Rip et Sinthiou Malème. Les dates incluent dans les cercles représentent les dates de fertilisation à rendements stables

Malgré ces analyses qui donnent une vision globale des niveaux de rendements, de leur variabilité interannuelle et la possibilité de maintenir le niveau des rendements après un certain nombre de jours de retard de fertilisation, pour le producteur la décision de retarder la fertilisation est plutôt liée au début de saison d'une année donnée et peut se baser sur le risque de réduction ou gain de rendement. Les résultats qui suivent permettent de faire une analyse plus détaillée en fonction de ces critères.

4.4.2.2 Dates de fertilisation optimales à partir de gain de rendements

En années humides : à début de saison déficitaire, la date du premier apport d'engrais pour une variété à cycle court peut être repoussée après la levée de 20 à 55 jours et de 11 à 26 jours respectivement à Nioro du Rip et Sinthiou Malème pour un maintien et/ou gain à la fois de biomasse et grain par rapport à la recommandation alors que pour une variété à cycle moyen, un décalage de 20 à 40 jours à Nioro du Rip et de 14 à 24 jours à Sinthiou Malème permet

d'obtenir des rendements biomasse et grain similaires ou supérieurs à la pratique recommandée (première application à la levée). En ce qui concerne une variété à cycle long, un report du premier apport de 21 à 36 et de 16 à 41 jours après la levée respectivement à Nioro du rip et Sinthiou Malème procure des rendements biomasse et grain similaires ou supérieurs au rendement en appliquant la fertilisation suivant la recommandation (Figure 4.3).

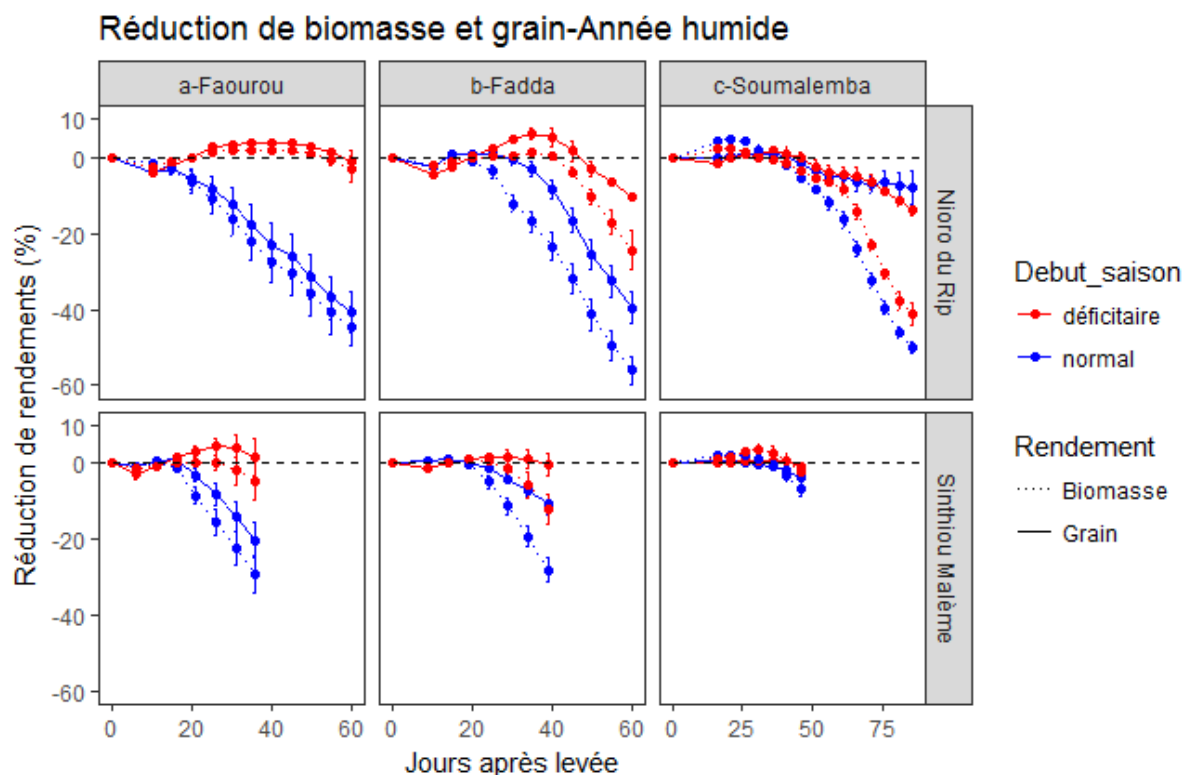


Figure 4.3 : Réduction ou gain moyen et erreur standard de rendements biomasse (trait en pointillet) et grain (trait plein) pour les différentes dates de fertilisation pendant les années humides à Nioro du Rip et Sinthiou Malème

L'échelle de l'axe x (jour après levée) diffère d'une variété à l'autre. 0 jour correspond à la date de levée, modalité R, L= 45 et 21 jours pour Faourou, L= 45 et 24 jours pour Fadda et L= 71 et 31 jours pour Soumalemba respectivement à Nioro du Rip et Sinthiou Malème.

En années normales : il n'y a pas d'intérêt (gain) à retarder la fertilisation en un début de saison déficitaire pour des variétés à cycle court et moyen à Nioro du Rip. Le risque de réduction du rendement grain et biomasse est permanent. Cependant, il peut être minimisé en choisissant de retarder la première application d'engrais de 10 à 25 jours après la levée. Par contre, pour une production de grain, on pourra retarder la fertilisation de 20 à 40 jours pour une variété à cycle moyen par exemple. A Sinthiou Malème, l'effet des sécheresses de début de saison sur la fertilisation peut être mitigé en décalant la date du premier apport de 11 à 21 jours et de 9 à 24

jours pour les variétés à cycle court et moyen respectivement. Dans un programme de production de grain, ces délais prolongés de 5 jours donnent aussi des gains. Quant à une variété à cycle long, la fertilisation peut être retardée jusqu'à 36 jours après levée, en cas de début de saison déficitaire pour une double production sur les deux sites (Figure 4.4).

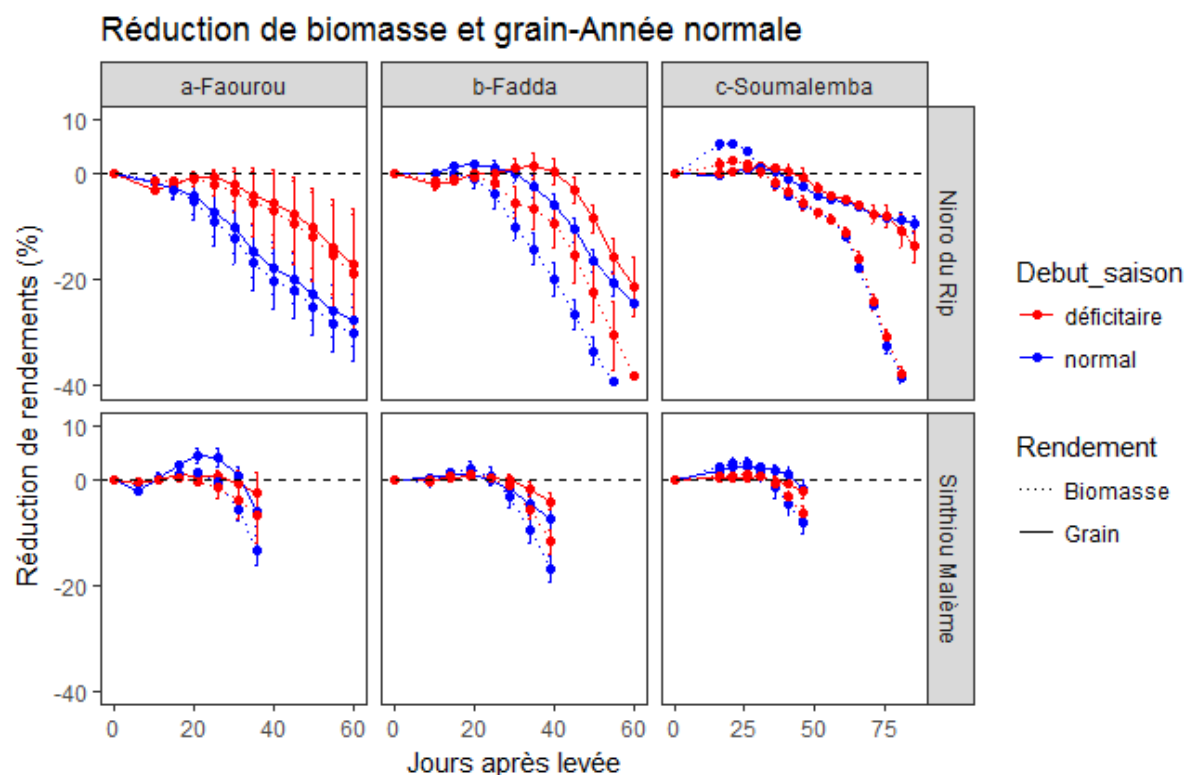


Figure 4.4 : Réduction ou gain moyen et erreur standard de rendements biomasse (trait en pointillet) et grain (trait plein) pour les différentes dates de fertilisation pendant les années normales à Nioro du Rip et Sinthiou Malème

L'échelle de l'axe x (jour après levée) diffère d'une variété à l'autre. 0 jour correspond à la date de levée, modalité R, L= 45 et 21 jours pour Faourou, L= 45 et 24 jours pour Fadda et L= 71 et 31 jours pour Soumalemba respectivement à Nioro du Rip et Sinthiou Malème.

En années sèches : lorsque le début de saison d'une année sèche est déficitaire, les fenêtres optimales de premières applications d'engrais sont de 20 à 35 jours après la levée à Nioro du Rip et 6 à 26 jours à Sinthiou Malème pour une variété à cycle court, de 15 à 25 jours à Nioro du Rip et 9 à 19 jours à Sinthiou Malème pour une variété à cycle moyen, de 21 à 26 jours à Nioro du Rip et de 16 à 26 jours à Sinthiou Malème pour une variété à cycle long pour optimiser la production de biomasse tout comme de grain. Cependant, un décalage jusqu'à 46 et 36 jours respectivement à Nioro du Rip et Sinthiou Malème permet de produire plus de grain qu'une fertilisation aux dates recommandées en ce qui concerne une variété à cycle long (Figure 4.5).

Par ailleurs, le décalage jusqu'à 26 jours après la levée de la première date de fertilisation, en début de saison déficitaire permet de ne pas perdre ou de faire des gains de biomasse ou de grain par rapport à la recommandation selon les années, variété et site. (Figures 4.3, 4.4 et 4.5). Enfin, indépendamment des années et des variétés, à priori il n'y a pas d'intérêt à retarder la fertilisation à un début de saison normal. Cependant, on note quelques avantages (production équivalente ou supérieure à la recommandation) avec les dates tardives d'apport pour les variétés à cycle moyen (Figures 4.3b, 4.4b et 4.5b) et long (Figures 4.3c ; 4.4c & 4.5c) sur les deux sites alors que la variété à cycle court ne montre d'avantage à un décalage de dates de fertilisation pour un début de saison normal qu'à Sinthiou Malème (Figure 4.3a et 4.4a et 4.5a). De ces résultats, il apparaît que lorsque le début de saison semble déficitaire, les reports de dates de fertilisation sont des solutions possibles.

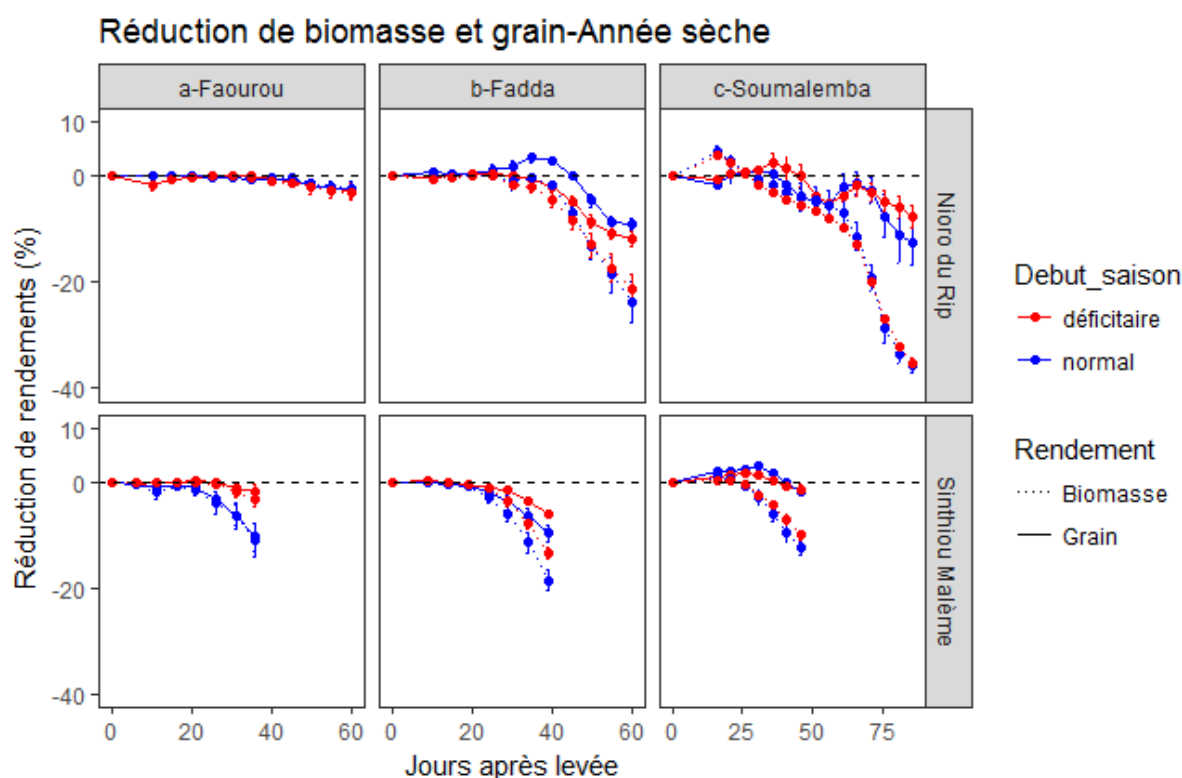


Figure 4.5: Réduction ou gain moyen et erreur standard de rendements biomasse (trait en pointillet) et grain (trait plein) pour les différentes dates de fertilisation pendant les années sèches à Nioro du Rip et Sinthiou Malème

L'échelle de l'axe x (jour après levée) diffère d'une variété à l'autre. 0 jour correspond à la date de levée, modalité R, L= 45 et 21 jours pour Faourou, L= 45 et 24 jours pour Fadda et L= 71 et 31 jours pour Soumalembe à respectivement à Nioro du Rip et Sinthiou Malème.

4.4.2.3 Utilisation de l'azote (N)

Les figures 4.6 et 4.7 montrent le N prélevé et N lessivé simulés des différentes options de dates de fertilisation sous conditions pluviales. La simulation des différents scénarii montre que l'utilisation ou gestion de N (prélèvement et lessivage) est plus variable à Nioro du Rip qu'à Sinthiou Malème. La médiane de N prélevé augmente avec le décalage de la fertilisation jusqu'au 30^e jour après la levée pour la variété à cycle court et 35 ou 36^e jour pour les variétés à cycle moyen et long à Nioro du Rip, correspondant aux stades de développement « entre tallage et montaison » pour les variétés à maturité précoce et intermédiaire et au tallage pour les variétés à maturité tardive. La médiane de N prélevé décroît au-delà de ces dates. A Sinthiou Malème, le N prélevé augmente constamment jusqu'au 36^e, 39^e et 31^e jour après la levée respectivement pour les variétés à cycle court, moyen et long (Figure 4.6) correspondant aux mêmes stades de développement.

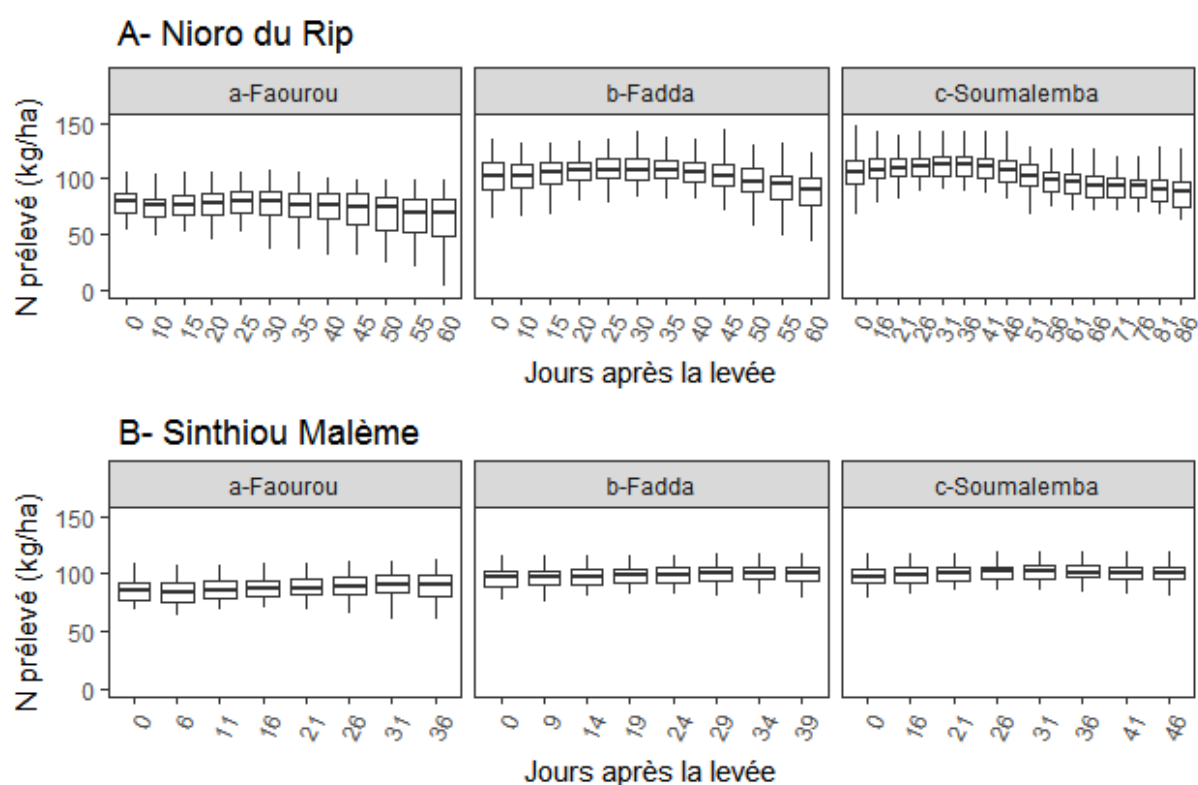


Figure 4.6 : Azote prélevé simulé sous les différentes dates de fertilisation en conditions pluviales à Nioro du Rip (A) et Sinthiou Malème (B)

L'échelle de l'axe x (jour après levée) diffère d'une variété à l'autre. 0 jour correspond à la date de levée, modalité R, L= 45 et 21 jours pour Faourou, L= 45 et 24 jours pour Fadda et L= 71 et 31 jours pour Soumalemba respectivement à Nioro du Rip et Sinthiou Malème.

Par ailleurs, indépendamment de la localité et du cycle de la variété, les modalités de dates de fertilisation montrent une tendance décroissante de la médiane de N lessivé. Cependant, cette tendance à la baisse est moins prononcée à Sinthiou Malème. Plus on fertilise tard, moins on lessive d'azote en particulier pour les variétés à cycle court et moyen à Nioro du Rip. (Figure 4.7). La fertilisation tardive semble donc réduire ou minimiser le risque de perte d'azote.

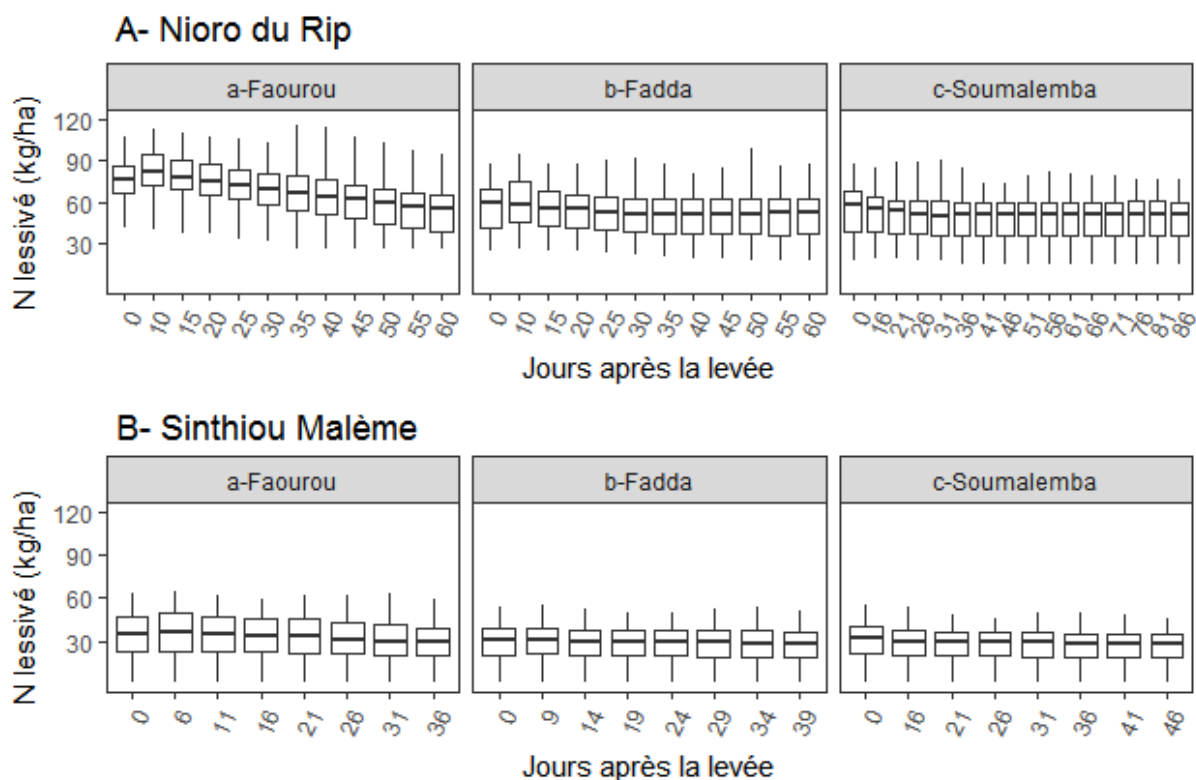


Figure 4.7 : Azote lessivé simulé sous les différentes dates de fertilisation en conditions pluviales à Nioro du Rip (A) et Sinthiou Malème (B)

L'échelle de l'axe x (jour après levée) diffère d'une variété à l'autre. 0 jour correspond à la date de levée, modalité R, L= 45 et 21 jours pour Faourou, L= 45 et 24 jours pour Fadda et L= 71 et 31 jours pour Soumalembe respectivement à Nioro du Rip et Sinthiou Malème.

4.5 Discussion

4.5.1 Caractérisation de la pluviosité

Les résultats de la moyenne pluviométrique, de la variabilité interannuelle mesurée par le coefficient de variation, du nombre d'années humides, normales et sèches calculés sur les 67 ans (Figure 4.1 et Tableaux 4.2) donnent des valeurs proches pour les deux localités. Ce qui confirme l'appartenance des deux localités à la même zone climatique (Salack *et al.*, 2011). Cependant, malgré leur appartenance à la même zone climatique, Nioro du Rip et Sinthiou Malème diffèrent par l'occurrence des années humides et sèches. Les périodes d'années sèches ressortent clairement à Sinthiou Malème avec les périodes de 1970 à 1990 et de 2000 à 2016. A Nioro du Rip, elles sont plus prononcées de 1970 à 1990, période connue comme celle de grande sécheresse des années 70 au Sahel marquée par la famine (Ozer *et al.*, 2010; Masih *et al.*, 2014). En outre, les années humides ou normales ne sont pas épargnées par un début de saison de culture déficitaire en pluie ni même une année sèche de connaître un bon démarrage de saison malgré un cumul de pluie sur l'ensemble de la saison relativement faible ou déficitaire. Ces résultats indiquent que les applications d'engrais devraient être gérées selon les années, début de saison et sites. Ainsi, quelles que soient la localité et la nature des années de cultures, les pluies (cumul) de début de saison restent un indicateur important dans l'orientation de la fertilisation.

4.5.2 Optimisation de la date d'application d'engrais/azote

En utilisant l'outil « seasonal analysis » de DSSAT-CSM-CERES-Sorghum, nous avons pu évaluer la possibilité d'une fertilisation décalée globalement et son intérêt selon le début de saison (normal ou déficitaire) d'une année donnée. On observe une grande variabilité interannuelle des rendements biomasse et grain en fonction des dates d'application d'engrais/azote (Figures 4.2). Ceci indique que les réponses à la fertilisation seraient intrinsèquement liées aux dates d'apports, mais aussi à la pluviométrie au cours des 67 ans. Plusieurs études (Akponikpè *et al.*, 2010; Amaral *et al.* 2011; MacCarthy *et al.*, 2009, 2015) ont rapporté la climato-dépendance de la réponse des cultures à la fertilisation minérale et des variations inter-saisonnières des rendements. La productivité des cultures et la rentabilité de l'utilisation d'engrais varient considérablement dans l'espace et dans le temps, même sur un même sol, en particulier dans l'agriculture pluviale (MacCarthy *et al.*, 2015). Nous avons constaté que la variabilité des rendements est plus importante (variance élevée) lorsque la date de fertilisation est plus tardive (Figure 4.2).

4.5.2.1 Choix des dates selon l'objectif de production

Le choix des dates de fertilisation est très variable. Par exemple, on peut décider de faire le choix soit pour un objectif de production de grain soit de biomasse ou de la double production comme nous l'avons fait dans cette étude. Mais aussi, il peut aussi se baser sur un niveau de risque tolérable et économiquement soutenable de réduction de la production de 5% ou 10% selon l'agriculteur ou le décideur (Amaral *et al.*, 2009, 2011; Andrade *et al.*, 2009). Dans ce cas, les dates de fertilisation à recommander seront différentes des choix faits dans ce chapitre qui sont basés sur un objectif de double production (biomasse et grain) et sans prise de risque de réduction de rendements. Ces choix ont été faits au vu de l'importance de l'activité agropastorale au Sénégal et de l'incertitude sur un bon début de saison, dans le but de maintenir ou augmenter la production (biomasse et grain) par rapport à la pratique recommandée.

En se basant sur la variabilité interannuelle, il apparaît avec les résultats globaux de biomasse et grain (Figure 4.2) qu'un décalage de la date de fertilisation sera bénéfique et offrirait des rendements plus ou moins stables (variances faibles). Les résultats de notre étude montrent que d'une manière générale un retard de la fertilisation, avec un premier apport entre le tallage et la montaison, par rapport à un premier apport au semis ou à la levée et un deuxième au tallage (recommandé) ne serait pas néfaste au producteur. La sélection d'une fenêtre de dates de fertilisation appropriées est une stratégie de gestion des cultures sans coût pour l'agriculteur mais, dans des conditions climatiques variables, elle doit aussi permettre de minimiser la variabilité interannuelle du rendement. Ainsi, nous avons choisi de définir nos fenêtres de dates d'apport d'engrais en fonction d'un niveau de rendement proche ou identique à celui obtenu avec une fertilisation azotée appliquée dès la levée (recommandation de la recherche) en apportant la fertilisation jusqu'à 20 et 25 jours après la levée (28 et 33 jours après semis, jas) respectivement pour une variété à cycle court et moyen dans les deux environnements pour une double production (paille et grain). S'agissant d'une variété à long cycle de culture, une fertilisation dans les 26 jours après la levée (34 jas) à Sinthiou Malème offre des rendements (biomasse et grain) moins variables alors qu'à Nioro du Rip le choix est plus basé sur le but de la production. Ainsi, pour la biomasse, les dates d'application d'azote comprises entre 0-31 jours après la levée (8-39 jas) et pour le grain les dates entre 61 et 81 jours après la levée (69 et 89 jas) offrent des rendements à variance faible. A l'exception de la production de grain de Soumalemba à Nioro du Rip où les rendements à faible variance sont obtenus avec des apports entre montaison et épiaison, globalement les rendements plus stables (faible variance) sont obtenus avec les premiers apports faits au tallage.

4.5.2.2 Choix des dates selon le type d'année

De manière plus spécifique, nous avons aussi montré que le choix de la fenêtre des dates de fertilisation peut être fait en fonction des types d'année et du type de début de la saison (déficitaire ou non). Il semble qu'en cas de début difficile de la saison des pluies (déficitaire) à Nioro du Rip, indépendamment des années et du cycle des variétés une fertilisation entre le 20^e et 25^e jour après la levée (soit 28 à 33 jas) permet de maximiser ou optimiser la production de biomasse et grain. A Sinthiou Malème, indépendamment des années, en cas de début de saison déficitaire les fenêtres de dates optimales de première application se situent entre le 11^e et 21^e jour après la levée (soit entre 19 et 29 jas) pour une variété à cycle court, entre 14^e et 19^e jour après la levée (soit entre 22 et 27 jas) pour une variété à cycle moyen et entre le 16^e et 26^e jour (soit entre 24 et 34 jas) pour une variété à cycle long. Ces dates correspondent aux stades de développement, tallage à montaison pour les variétés à cycle court et moyen et au tallage pour la variété à cycle long (Chapitre 2, Figure 2.3). Ceci suggère qu'il est mieux de faire la fertilisation tardive (première application d'engrais) entre le tallage et la montaison pour les variétés de maturité précoce à intermédiaire et au tallage pour celles à maturité tardive sachant que le prélèvement maximal de N est obtenu avec les apports effectués entre le 30^e et 39^e jour après la levée (38 à 47 jours après semis) quels que soient le site et les variétés (Figure 4.6). Les applications tardives d'engrais devront donc être faites plus précocement que ce qui est testé en expérimentation (date d'application L), sans apport au semis ou à la levée mais à la montaison et épiaison (chapitre 2). Vanderlip (1993) rapporte pour une variété de sorgho d'environ 95 jours (variété à maturité précoce), qu'au stade moitié-floraison (60 jours après la levée), environ la moitié de la biomasse de la plante est déjà formée et les besoins de la plante, près de 60 % de P, 70% de N et 80% de K sont déjà prélevés. Ce qui confirme l'importance des stades de développement précoces dans la nutrition des plants de sorgho.

4.5.2.3 Intérêt pour le producteur à retarder la date de fertilisation

Cette étude a révélé qu'en un début de saison déficitaire, on ne perd pas de biomasse ou de grain avec une fertilisation jusqu'à 26 jours après la levée (soit 34 jas) sur les deux sites ou pour une variété à maturité précoce, on augmente de 4 et 5% le rendement grain respectivement à Nioro du Rip et Sinthiou Malème, de 6 et 2% pour une variété à maturité intermédiaire et de 2% pour une variété à maturité tardive sur les deux sites avec la fertilisation retardée. Ceci indique que le producteur peut toujours fertiliser de manière tardive s'il avait décidé de ne pas fertiliser son champ au début de saison parce que la saison démarre mal et peut toujours faire de gain par rapport au non-apport d'engrais. Il n'est pas surprenant que la variété à maturité

tardive fasse moins de gain car ayant un cycle de plus de 135 jours, elle est plus adaptée aux régions de plus de 1000 mm d'eau avec une saison pluvieuse s'étallant à plus de 4 mois (McGuire, 2002; Lacy *et al.*, 2006).

Par ailleurs, on note quelques gains de rendements en retardant la fertilisation en dépit d'un début de saison normal. Ceci pourrait être expliqué par une bonne distribution de la pluviométrie au cours de la saison qui fait que même retardée, la fertilisation a été bénéfique aux plantes. L'azote apporté tardivement a pu donc bénéficier de l'humidité du sol au cours de la saison de culture. De plus, en un début de saison normal quelle que soit l'année, on a de gain en retardant la fertilisation jusqu'à 41 jours pour Soumalemba. La fertilisation dès la levée serait trop précoce pour cette variété.

Enfin, la fertilisation tardive permet de minimiser les pertes d'azote sous forme de lessivage. Au-delà des gains ou de non-pertes de rendements, elle permet donc de protéger l'environnement par une diminution du lessivage de N. La rétention de l'azote dans le sol ou dans les parties de la plante (racines, tiges et feuilles) permettra d'améliorer (par enfouissement et minéralisation) le pool de N dans le sol et par conséquent de réduire les quantités d'azote à apporter en seconde année de culture. Ce résultat est en phase avec celui de Boman *et al.* (1995) qui rapportent que les applications tardives de N au cours de la saison permettent de réduire les pertes potentielles d'azote résultant du lessivage ou de la dénitrification.

4.6 Conclusion

L'analyse de la séquence des pluies de 1950 à 2016 à Nioro du Rip et Sinthiou montre une différente distribution des années sèches et humides, avec Sinthiou Malème présentant des caractéristiques climatiques d'une localité plus sèche (plus d'années sèches et plus d'années à début de saison déficitaire). Cependant, les deux localités sont proches en termes de moyenne de pluies reçues, et les deux localités présentent une récurrence des années sèches à partir des années 1970. DSSAT-CSM-CERES-Sorghum s'avère un outil intéressant d'aide à la prise de décision concernant les dates de fertilisation. Les réponses à la fertilisation tardive ont été variables à travers les sites et le cycle des variétés dépendant du cumul total saisonnier de pluies et de la nature du début de saison. Pour un début de saison tardif ou déficitaire, il faut apporter la première application d'engrais entre le tallage et la montaison pour les variétés à maturité précoce et intermédiaire, et au tallage pour les variétés à maturité tardive. Elle correspond à Nioro du Rip à un apport entre le 20^e et 25^e jour après la levée (28 à 33 jours après semis) indépendamment du cycle de la variété et des années et à Sinthiou Malème, à une application

pour une variété à maturité précoce entre le 11^e et 21^e jour après la levée (soit entre 19 et 29 jours après semis); entre 14^e et 19^e jour après la levée (soit entre 22 et 27 jours après semis) pour une variété à maturité intermédiaire et entre le 16^e et 26^e jour (soit entre 24 et 34 jours après semis) pour une variété à maturité tardive indépendamment de l'année pour les trois variétés. Un report de la fertilisation jusqu'à 26 jours après la levée (34 jours après semis) dans les deux localités permet de ne pas perdre de biomasse ou grain. Les gains de rendement grain avec ces dates varient de 2 à 6% et de 2 à 5% respectivement à Nioro du Rip et Sinthiou Malème. La fertilisation tardive permet une bonne utilisation de N, avec une diminution de l'azote lessivé. En dépit du gain observé de la fertilisation tardive avec le climat présent, il serait intéressant de l'évaluer sur le climat futur c'est-à-dire les projections du climat pour l'Afrique sub-saharienne afin d'anticiper sur les mesures d'adaptation ou résilience au changement climatique.

Chapitre 5 : Discussion générale

5.1 Objectif et démarche méthodologique

L'objectif du présent travail a été de générer des recommandations aux agriculteurs sur la fertilisation minérale de leurs parcelles de sorgho en relation aux informations météorologiques. Pour y parvenir, nous avons combiné des approches expérimentales et de modélisation. Tout d'abord, nous avons évalué le développement et croissance et les rendements de 4 variétés de sorgho à maturité contrastée soumises à 5 modalités de fertilisation en conditions pluviales contrastées. La collecte de données s'est effectuée via des expérimentations conduites en conditions semi-contrôlées (stations) pendant deux ans (2015 et 2016) à Nioro du Rip et Sinthiou Malème, deux sites à différents cumuls pluviométriques. Le choix de ces stations s'est fait sur la base de leurs différences pédoclimatiques, ayant pour objectif de conduire ces expérimentations dans des environnements contrastés, pour identifier les interactions variété*environnement*fertilisation. Sur la base de ces informations, le modèle DSSAT-CSM-CERES-Sorghum de DSSAT (v4.7) a été calibré et évalué en conditions de stress minimal d'azote et d'eau puis en conditions de stress azoté contrastées (incluant des dates d'apport tardif). Ce travail de calibration a ensuite permis de faire une étude exploratoire des dates de fertilisation. Pour cela, l'outil d'analyse saisonnière de DSSAT a été utilisé pour explorer les dates de fertilisation appropriées en cas de démarrage tardif ou déficitaire de la pluviométrie à partir des données climatiques journalières de 67 ans. Cette exploration sur les données climatiques historiques avait pour objectif d'identifier des dates de fertilisation tardive intéressantes en fonction du climat observé, afin de définir des recommandations pour les producteurs, surtout dans le cas d'un début de saison pluvieuse déficitaire.

Cette démarche méthodologique a permis d'aboutir à des résultats intéressants notamment sur l'intérêt d'une fertilisation retardée et l'atout des modèles de culture comme outils d'aide à la prise de décision. Il sera présenté dans un premier temps, les principaux résultats obtenus et les recommandations, puis sera abordé dans un deuxième temps les limites du travail et les perspectives qui peuvent lui être données.

5.2 Principaux résultats obtenus

5.2.1 Avantages de la fertilisation tardive

Nos travaux ont montré que, la fertilisation tardive appliquée comme stratégie d'adaptation à d'un début de saison de pluies tardif, permettait aux plantes non fertilisées dès la levée de retrouver une croissance normale similaire à celle des plantes ayant reçues des engrais dès la levée (Figure 2.8). Ce résultat révèle que les plantes peuvent toujours tirer bénéfice d'un apport

relativement tardif de nutriments. Cette pratique permet donc de booster la croissance des plants stressés à la suite de la non-application des engrais, en particulier de l'azote, au tout début du cycle de croissance. Ce regain de croissance s'est traduit différemment sur les rendements grains en fonction des interactions environnement-fertilisation (Figure 2.5), de la variété et du potentiel des sites d'expérimentation (Figures 2.6 et 2.7) comme l'ont montré nombre d'études sur le sorgho (Zaongo *et al.*, 1997; Hao *et al.*, 2014) et sur le blé (Alston, 1979; Garrido-Lestache *et al.*, 2004; Blandino *et al.*, 2015). Le rendement grain avec la moitié dose apportée tardivement (T5) a été meilleur que celui de 100% d'engrais apportés tard dans la saison (T4) en condition plus humide (1155 mm, Figure 2.5). Le rendement grain avec 100% d'engrais apportés tard dans la saison (T4) était supérieur à celui de 100% d'engrais apporté tôt dans la saison (recommandation, T2) lorsque le potentiel des sites était faible et en fonction de la quantité d'eau reçue après l'apport tardif et la variété. Ainsi, les variétés de type guinée à maturité tardive (Soumalemba) répondent mieux à la fertilisation tardive sur les sols à faible teneur en N s'ils reçoivent une quantité d'eau supérieure à 400 mm après l'application, alors que les variétés de type caudatum de maturité précoce à intermédiaire (Faourou et Soumba), répondent mieux à la fertilisation tardive (forte dose d'engrais) quelles que soient les teneurs en N du sol s'ils reçoivent beaucoup d'eau (≥ 400 mm). Les hybrides répondent mieux à la fertilisation tardive (faible dose d'engrais) indépendamment des teneurs en N s'ils reçoivent une quantité importante d'eau c'est-à-dire plus de 600 mm à partir de la date d'apport tardif à la maturité (Figure 2.7). Ces résultats confirment la synergie d'action entre l'humidité du sol et l'azote dans la production des cultures. Il ressort de cette étude (Chapitre 2) que la fertilisation tardive a été bénéfique aussi bien pour le grain que la biomasse. Elle demeure une alternative à la gestion de la fertilisation minérale telle que recommandée par l'ISRA ou pratiquée par les paysans, en cas de début de saison de pluie non favorable en particulier dans des pays agropastoraux comme le Sénégal. Ainsi, nous suggérons aussi aux structures d'appui technique aux paysans d'intégrer les prévisions ou observations pluviométriques dans les recommandations de fertilisation afin d'optimiser l'efficacité des engrais apportés.

5.2.2 Les modèles de culture, un atout indéniable

DSSAT-CSM-CERES-Sorghum a été capable de simuler en conditions optimales d'eau et d'azote la biomasse finale et le rendement grain avec des erreurs de prédiction comprises dans la variation des erreurs d'observation (Chapitre 3). Ce résultat était attendu car MacCarthy *et al.* (2010), Amouzou *et al.* (2018) et Adam *et al.* (2018) avaient rapporté la capacité du modèle à rendre compte des observations de biomasse et grain dans différentes conditions

environnementales en Afrique Sub-Saharienne. Globalement, le modèle a aussi réussi à reproduire le stress azoté en conditions de réduction de la dose d'apport d'engrais. Cependant, DSSAT-CSM-CERES-Sorghum a simulé très fortement le stress azoté dans les parcelles non fertilisées à la fois sur la biomasse et le grain et a simulé un niveau ou un effet du stress lié à l'apport tardif d'azote dans les parcelles moindre que celui de nos observations (Figure 3.9). La différence entre la réduction de rendement grain observé et simulé pourrait être attribuée d'une part à l'impact des contraintes biotique (maladies) et abiotique (carence en fer) sur le rendement final observé, contraintes non simulées pour l'instant par le modèle (Boote *et al.*, 1996). D'autre part, dans le fonctionnement du modèle, on s'aperçoit que lors d'un apport tardif d'azote, le stress est bien accentué en phase végétative mais il demeure trop atténué pendant la phase reproductive. Avec l'apport tardif d'azote, la concentration de N dans les parties végétatives revient à un optimum et donc le stress azoté en phase reproductive est similaire pour les traitements à dose identique mais apportés à différentes dates (apport tardif vs. apport recommandé) (Figure 3.10). C'est la première étude à notre connaissance à modéliser l'effet d'un apport tardif sur le sorgho. Ayant un modèle calibré et validé, nous pouvons alors faire des études d'exploration. Le modèle a donc permis d'explorer les multiples interactions entre le sol, la plante et le climat, ce qui était pratiquement impossible d'évaluer en expérimentation vu les différentes modalités possibles de chacune des composantes et leur combinaison. Ainsi, par des expérimentations virtuelles qui combinent les différentes dates d'application, la variabilité pédo-climatique et les cycles de sorgho, DSSAT-CSM-CERES-Sorghum a été un outil essentiel et indispensable dans la définition des dates optimales de première fertilisation en un début de saison déficitaire.

Les explorations de dates de fertilisation au moyen de DSSAT-CSM-CERES-Sorghum ont confirmé l'intérêt de la fertilisation tardive au cours des années avec un début de saison de pluie déficitaire. Le décalage des apports d'engrais jusqu'à 26 jours après la levée (34 jours après semis) sur les deux sites permet de ne pas perdre de rendement biomasse ou grain comparé à un apport d'engrais dès la levée, ou de produire plus de grains qu'une fertilisation aux dates recommandées de 2 à 6% et de 2 à 5% respectivement à Nioro du Rip et Sinthiou Malème. Cependant, l'avantage tiré d'une telle pratique varie en fonction du site, de l'année, du cycle de la variété et de l'objectif de production (grain et/ou biomasse) (Figures 4.3 – 4.5).

Les quantités simulées de N prélevé et lessivé, montrent que même apporté tard au cours du cycle de croissance, le N est bien utilisé par les plantes. Un tel résultat est important à considérer pour la santé environnementale. En effet, le risque de lessivage de N reste élevé lorsqu'il est

apporté plus tôt. Plus les précipitations et les écoulements de surface sont importants, plus les exportations ou pertes d'azote sont fortes (Tiemeyer *et al.*, 2006).

5.3 Recommandations

Sur la base des gains ou non-pertes obtenus pour une double production, certaines fenêtres de dates peuvent être recommandées pour la fertilisation tardive. Les fenêtres de première application se situent entre le tallage et la montaison pour les variétés à maturité précoce ou intermédiaire et au tallage pour les variétés à maturité tardive. Ces stades développement maximisent le prélèvement de N par la plante. La mise à disposition de l'ensemble des résultats de cette thèse aux services d'encadrement rural ou de vulgarisation et des producteurs permettra d'améliorer le rendement du sorgho par une meilleure gestion de l'apport d'azote dans les parcelles. Sur la base de notre étude, nous pouvons conclure que si une année démarre mal en termes de pluviosité (i.e. début d'année déficitaire) alors il est toujours possible pour le producteur d'apporter de l'engrais un peu plus tardivement. Des résultats plus précis sur ces dates d'apport ont explicitement été discutés dans cette thèse en fonction des variétés et des conditions environnementales.

Ainsi nous recommandons sur la base de nos résultats, en cas d'un début de saison déficitaire un apport en azote, suivant les localités :

✓ A Nioro du rip

- pour une variété à maturité précoce (85 à 95 jours), entre le 20^e et 55^e jour après la levée, 10^e et 25^e jour et 20^e et 35^e jour respectivement au cours des années humides, normales et sèches (soit un apport du tallage à la montaison) ;
- pour une variété à maturité intermédiaire (105 à 135 jours), entre le 20^e et 40^e, le 20^e et 25^e et entre le 15^e et 25^e jour après la levée respectivement au cours des années humides, normales et sèches (soit un apport entre tallage et montaison) et
- pour une variété à maturité tardive (au-delà de 135 jours) entre le 21^e et 36^e, le 16^e et 36^e et entre le 21^e et 26^e jour après la levée respectivement au cours des années humides, normales et sèches (soit un apport au tallage).

✓ A Sinthiou Malème

- pour une variété à maturité précoce entre le 6^e et 26^e, le 11^e et 21^e j et entre le 11^e et 26^e jour après la levée, respectivement au cours des années humides, normales et sèches (soit un apport du tallage à la montaison);

- pour une variété à maturité intermédiaire entre le 14^e et 24^e, le 9^e et 24^e et entre le 9^e et 19^e jour après la levée respectivement au cours des années humides, normales et sèches (soit un apport au tallage) et
- pour une variété à maturité tardive entre le 16^e et 41^e, le 16^e et 36^e et entre le 16^e et 26^e jour respectivement au cours des années humides, normales et sèches (soit un apport au tallage).

Une variabilité est observée dans les dates recommandées pour le premier apport d'engrais (azote) d'un site à un autre pour un type d'année donné selon la variété. La différence des sols expérimentaux (sableux et limono-sableux) expliquerait cette variation à travers une différence de N lessivé (plus élevé à Niro du rip, Figure 4.7) et de la rétention des pluies reçues entre les deux sols. Zingore *et al.* (2007) rapportent que les propriétés physiques du sol telle la texture influence la réponse des cultures à la fertilisation minérale.

5.4 Insuffisances du travail

Cette étude a contribué à montrer l'intérêt de la fertilisation tardive et à générer des conseils sur les dates de fertilisation en zone soudano-sahélienne du Sénégal. Cependant, comme toute étude, elle présente des limites. En effet, la période de thèse étant très courte, les expérimentations n'ont pu aller au-delà de 2 ans de collecte de données. De plus, les essais initiés en milieu paysan en 2016 pour diversifier les environnements et comparer ces données à celles obtenues en stations n'avaient pu être conduits à terme en raison des difficultés techniques liées au suivi en particulier à l'application à temps des engrais. Par ailleurs, l'essai à Sinthiou Malème en 2016 a été celui qui a reçu le moins d'eau, cependant il présentait les meilleures réponses. Ces résultats révèlent qu'en plus du régime pluviométrique, la texture du sol contribuerait à l'expression des apports tardifs. Malheureusement, l'analyse en covariance réalisée n'a pu permettre de mettre en exergue la contribution de la texture (taux de limon). Une autre insuffisance est la difficulté de caractériser la distribution de pluies (fréquence de pluie) pendant la saison qui fait bénéficier aux plantes les apports tardifs. Malgré, la définition d'un indicateur, le seuil de déficit pluviométrique de la saison (SDPs), celui-ci ne reste qu'un cumul qui ne renseigne pas sur la distribution de la pluie durant le début de saison. La combinaison des quantités de pluie et leur fréquence de distribution depuis l'application tardive à la maturité qui corrèle avec les réponses à la fertilisation tardive n'a pu également être déterminée. Enfin, c'est la première étude à notre connaissance à modéliser l'effet d'un apport tardif sur le sorgho. DSSAT-CSM-CERES-Sorghum a bien représenté le grain et biomasse finale en conditions

optimales et reproduit le stress azoté dans différentes situations (sans apport de N et apport réduit ou tardif de N). Néanmoins, sa représentation du stress N est trop accentuée lorsqu'on n'apporte pas de N ou moins marquée sur les grains lorsqu'on fait un apport azoté tardif. Il serait opportun de revoir les codes ou algorithmes du modèle sur N afin d'améliorer la simulation du stress azoté lié à un apport tardif sur les grains en particulier. Les discussions avec l'équipe de DSSAT-Foundation (<https://DSSAT.net>) en ce sens viennent d'aboutir à un accord sur l'exploration des pistes d'amélioration ou la révision desdits codes.

Conclusion générale et perspectives

Conclusion générale

Ce travail de thèse s'inscrit dans le cadre d'une contribution à la formulation des recommandations sur la fertilisation aux agriculteurs en relation aux informations climatiques de début de saison. Les résultats montrent que la fertilisation tardive permet aux plants (sans application d'engrais) initialement stressés de recouvrer la croissance comme dans le cas des apports précoces dans la saison. Le rendement grain avec l'apport tardif a été variable. Le rendement grain avec 100% d'engrais apportés tard dans la saison (T4) était supérieur à celui de la recommandation (100% d'engrais apporté tôt dans la saison, T2) lorsque le potentiel des sites pour T2 était faible. En condition plus humide (1155 mm), l'apport tardif de la moitié dose (T5) a été plus bénéfique en termes de production de grain que l'application tardive de la dose entière.

Le modèle CSM-CERES-Sorghum de DSSAT a bien reproduit la phénologie, la biomasse végétative et les rendements finaux (biomasse et grain) dans les conditions optimales d'apport d'engrais et d'humidité. De plus, il a bien simulé l'effet du stress azoté lié à une diminution d'azote dans les parcelles et l'effet du stress azoté dû à un apport tardif sur la biomasse finale. Cependant, il a montré quelques faiblesses dans la simulation de l'effet du stress azoté lié à un apport tardif sur la production de grain simulée, lequel effet était moins prononcé comparé aux données observées. Néanmoins, son utilisation a permis de formuler quelques recommandations sur les dates de fertilisation. Les fenêtres de première application se situent entre le tallage et la montaison pour les variétés à maturité précoce ou intermédiaire et au tallage pour les variétés à maturité tardive pour un début de saison tardif. En particulier, à Nioro du rip, les apports en engrais (azote) devraient tenir entre le 20^e et 25^e jours après la levée soit entre 28 et 33 jours après semis indépendamment du type d'année et du cycle de la variété. A Sinthiou Malème pour un début de saison déficitaire, l'engrais devrait s'appliquer pour une variété à maturité précoce entre le 11^e et 21^e jour après la levée soit 19 à 29 jours après semis, entre le 14^e et 19^e jours après la levée soit 22 à 27 jours après semis pour une variété à maturité intermédiaire et entre le 16^e et 26^e jour après la levée soit 24 à 34 jours après semis pour une variété à maturité tardive indépendamment de l'année. L'application tardive d'engrais jusqu'à 26 jours après levée ou 34 jours après semis permet de ne pas perdre de biomasse ou grain.

Perspectives

La combinaison d'une approche expérimentale et de modélisation nous a permis de tester une gamme importante de conditions environnementales et d'explorer l'effet d'apport tardif d'azote dans le cas de début de saison déficitaire. Cependant, il serait opportun de conduire une expérimentation à plus long terme et en milieu paysan afin de mieux prendre en compte la diversité pédoclimatique. Ce type d'expérimentation nous permettrait alors de mieux capturer ou comprendre la contribution de la texture en particulier des sols riches en particules fines (limon et argile) dans la réponse du sorgho aux apports tardifs via les modèles, et donc d'avoir des outils encore mieux adaptés aux études exploratoires. En effet, dans le chapitre 3 de cette thèse, nous avons pu reproduire, grâce au modèle CSM-CERES-Sorghum de DSSAT, les comportements de variétés contrastées de sorgho à différents apports d'azote. Cependant, nous avons aussi pu relever quelques insuffisances qui méritent d'être adressées pour améliorer le modèle et ainsi améliorer l'étude exploratoire effectuée dans le chapitre 4, et de pouvoir envisager les explorations de dates et doses de fertilisation avec les données du climat futur (horizon 2050) prédit pour l'ASS afin d'anticiper les effets des mauvais démarrages de saison de pluie.

Enfin, à notre connaissance, nous avons présenté dans cette thèse pour la première fois une étude de modélisation sur l'effet des apports tardifs sur le sorgho en Afrique de l'Ouest. Dans la dynamique internationale des comparaisons de modèles, il serait intéressant de pouvoir mener une étude similaire avec d'autres modèles de cultures tels « Agricultural Production Systems sIMulator (APSIM) » et « Simulateur mulTIdisciplinaire pour les Cultures Standard (STICS) » afin de comparer les performances des trois modèles dans la simulation des réponses aux apports tarifs d'engrais en Afrique Sub-Saharienne.

Références bibliographiques

- Adam, M., Dzotsi, K.A., Hoogenboom, G., Traoré, P.C.S., Porter, C.H., Rattunde, H.F.W., Nebie, B., Leiser, W.L., Weltzien, E., Jones, J.W., 2018. Modelling varietal differences in response to phosphorus in West African sorghum. *Eur. J. Agron.* <https://doi.org/10.1016/j.eja.2018.04.001>
- Affholder, F., 2001. Modélisation de culture et diagnostic agronomique régional. Mise au point d'une méthode et application au riz chez les petits producteurs du Brésil Central. Institut National Agronomique Paris-Grignon.
- Agreste, 2005. L'ajustement de la fertilisation en pointe dans les grandes exploitations. Agreste primeur 4.
- Akponikpè, P.B.I., Gérard, B., Michels, K., Biielders, C., 2010. Use of the APSIM model in long term simulation to support decision making regarding nitrogen management for pearl millet in the Sahel. *Eur. J. Agron.* 32, 144–154. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2009.09.005>
- Alagarswamy, G., Reddy, D.M., Swaminathan, G., 1998. Durations of the photoperiod-sensitive and -insensitive phases of time to panicle initiation in sorghum. *F. Crop. Res.* 55, 1–10. [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(97\)00039-7](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(97)00039-7)
- Alagarswamy, G., Virmani, S.M., 1996. Risk analysis of rainfed sorghum production at various levels of nitrogen fertilizer rate with the CERES Sorghum crop simulation model, in: Ito, O., Johansen, C., Adu-Gyamfi, J.J., Katayama, K., J.V.D.K., K.R., Rego, T.J. (Eds.), *Dynamics of Roots and Nitrogen in Cropping Systems of the Semi-Arid Tropics*. Japan International Research Center for Agricultural Sciences and the International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics (ICRISAT), Patancheru, Andhra Pradesh, India, pp. 603–616.
- Ali, A., Lebel, T., Amani, A., 2008. Signification et usage de l'indice pluviométrique au Sahel. *Sécheresse* 19, 227–235. <https://doi.org/10.1684/sec.2008.0148>
- Alston, A.M., 1979. Effects of soil water content and foliar fertilization with nitrogen and phosphorus in late season on the yield and composition of wheat. *Aust. J. Agric. Res.* 30. <https://doi.org/10.1071/AR9790577>
- Amadou, M., Gandah, M., Biielders, C.L., van Duivenbooden, N., 1999. Optimizing soil water use in Niger: research, development, and perspectives, in: van Duivenbooden, N., Pala, M., Studer, C., Biielders, C.L. (Eds.), *Efficient Soil Water Use: The Key to Sustainable Crop Production in Dry Areas of West Asia, and North and Sub-Saharan Africa*. Niamey, Niger 26 - 30 April 1998 and Oman, Jordan 9 - 13 May 1998. ICARDA and ICRISAT, Aleppo, Syria, pp. 143–164.
- Amaral, T.A., Andrade, C. de L.T. de, Oliveira, A.C., Freitas, S.D. de, Santana, C.B., Moura, F.M., De, C.L.A., 2009. Metodologia para o Estabelecimento do Período de Semeadura de Milho. Sete Lagoas, Brazil.
- Amaral, T.A., de Andrade, C. de L.T., Alves, M.E.B., Sylva, D.F., 2011. Applying CSM-CERES-Maize to define a sowing windows for irrigated maize crop: The riacho's farm case study. *Ambient. Agua* 6, 38–53. <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.184>
- Amiri, M., Mojaddam, M., Shokouhfar, A., Bakhtiarinejad, N., 2014. The effect of different levels and time of nitrogen application on grain yield, some physiological traits and

- nitrogen use efficiency in grain sorghum. *Indian J. Fundam. Appl. Life Sci.* 4, 223–227.
- Amouzou, A.K., Naab, J.B., Lamers, J.P.A., Becker, M., 2018. CERES-Maize and CERES-Sorghum for modeling growth, nitrogen and phosphorus uptake, and soil moisture dynamics in the dry savanna of West Africa. *F. Crop. Res.* 217, 134–149. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.12.017>
- Andrade, C. de L.T., Amaral, T.A., Freitas, S.D. de, Heinemann, A.B., Garcia, A.G., Hoogenboom, G., Magalhães, P.C., Samira, G. de A., 2009. Utilização do modelo CERES-Maize como ferramenta na definição de estratégias de semeadura de milho: 1- Sistema de produção de sequeira, in: Congresso Brasileiro de Agrometeorologia (Ed.), Mudanças Climáticas, Recursos Hídricos e Energia Para Uma Agricultura Sustentável. <https://doi.org/10.1021/jp064029m>
- ANSD, 2018. Bulletin mensuel des statistiques économiques de janvier 2018. Dakar, Sénégal.
- ANSD, 2016. Bulletin mensuel des statistiques économiques de décembre 2016. Dakar, Sénégal.
- Asseng, S., Ewert, F., Rosenzweig, C., Jones, J.W., Hatfield, L., Ruane, A.C., Boote, K.J., Thorburn, P.J., Rötter, R.P., Cammarano, D., Brisson, N., Basso, B., Martre, P., Aggarwal, P.K., Angulo, C., Bertuzzi, P., Biernath, C., Challinor, A.J., 2013. Uncertainty in simulating wheat yields under climate change. *Nat. Clim. Chang.* 3. <https://doi.org/10.1038/ncliamte1916>
- Ayoub, M., Guertin, S., Lussier, S., Smith, D.L., 1994. Timing and Level of Nitrogen Fertility Effects on Spring Wheat Yield in Eastern Canada. *Crop Sci.* 34, 748–756. <https://doi.org/10.2135/cropsci1994.0011183X003400030027x>
- Barbieri, A.P., Rozas, H.S., Echeverria, H.E., 2008. Time of nitrogen application affects nitrogen use efficiency of wheat in the humid pampas of Argentina. *Can. J. Plant Sci.* 88.
- Bassu, S., Brisson, N., Durand, J.L., Boote, K., Lizaso, J., Jones, J.W., Rosenzweig, C., Ruane, A.C., Adam, M., Baron, C., Basso, B., Biernath, C., Boogaard, H., Conijn, S., Corbeels, M., Deryng, D., De Sanctis, G., Gayler, S., Grassini, P., Hatfield, J., Hoek, S., Izaurralde, C., Jongschaap, R., Kemanian, A.R., Kersebaum, K.C., Kim, S.H., Kumar, N.S., Makowski, D., Müller, C., Nendel, C., Priesack, E., Pravia, M.V., Sau, F., Shcherbak, I., Tao, F., Teixeira, E., Timlin, D., Waha, K., 2014. How do various maize crop models vary in their responses to climate change factors? *Glob. Chang. Biol.* 20, 2301–2320. <https://doi.org/10.1111/gcb.12520>
- Bationo, A., Mkwunye, U., Vlek, P.L.G., Koala, S., Shapiro, B.I., 2003. Soil fertility management for sustainable land use in the West African Sudano-Sahelian Zone, in: Gichuri, M.P., Bationo, A., Bekunda, M.A., Goma, H.C., Ma-fongoya, P.L., Mugendi, D.N., Murwira, H.K., Nandwa, S.M., Nyathi, P., S-wift, M. (Eds.), Soil Fertility Management in Africa: A Regional Perspective. African Academy of Sciences; Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT); Tropical Soil Biology and Fertility (TSBF), Nairobi, Kenya, pp. 253–292.
- Bernhard-reversat, F., 1977. Observations sur la minéralisation in situ de l’azote du sol en savane sahélienne (Sénégal). *Cah. d’ORSTOM, Série Biol.* XII, 301–306.
- Blandino, M., Vaccino, P., Reyneri, A., 2015. Late-season nitrogen increases improve common and durum wheat quality. *Agron. J.* 107, 680–690. <https://doi.org/10.2134/agronj14.0405>

- Bodson, B., Vancutsem, F., Destain, J., Herman, J., Monfort, B., Couvreur, L., 2003. Evolution du fractionnement de la fumure azotée, in: CRA (Ed.), Livre Blanc “Céréales.” FUSAGx, Gembloux (Belgique), pp. 1–8.
- Boman, R.K., Westerman, R.L., Raun, W.R., Jojola, M.E., 1995. Timing of nitrogen application: Effects on winter wheat and residual soil nitrate. *Soil Sci. Soc. Am.* 59, 1364–1369. <https://doi.org/10.2136/sssaj1995.03615995005900050024x>
- Bonesmo, H., Bélanger, G., 2002a. Timothy yield and nutritive value by the CATIMO model: I. Growth and nitrogen. *Agron. J.* 94, 337–345. <https://doi.org/10.2134/agronj2002.3370>
- Bonesmo, H., Bélanger, G., 2002b. Timothy yield and nutritive value by the CATIMO model: II. Digestibility and fiber. *Agron. J.* 94, 345–350. <https://doi.org/10.2134/agronj2002.3370>
- Boote, K.J., Jones, J.W., Pickering, N.B., 1996. Potential uses and limitations of crop models. *Agron. J.* 88, 704–716. <https://doi.org/10.2134/agronj1996.00021962008800050005x>
- Bowen, W.T., Baethgen, W.E., 1998. Simulation as a tool for improving nitrogen management, in: Tsuji, G.Y., Hoogenboom, G., Thornton, P.K. (Eds.), *Understanding Options for Agricultural Production. Systems Approaches for Sustainable Agricultural Development*. Springer, Dordrecht, pp. 189–204. https://doi.org/10.1007/978-94-017-3624-4_10
- Brassard, M., 2007. Développement d’outils diagnostiques de la nutrition azotée du maïs-grain pour une gestion optimale de l’engrais azoté. Université de Laval, Québec.
- Brisson, N., Gary, C., Justes, E., Roche, R., Mary, B., Ripoche, D., Zimmer, D., Sierra, J., Bertuzzi, P., Burger, P., Bussière, F., Cabidoche, Y.M., Cellier, P., Debaeke, P., Gaudille, J.P., Hénault, C., Maraux, F., Seguin, B., Sinoquet, H., 2003. An overview of the crop model STICS. *Eur. J. Agron.* 18, 309–332. [https://doi.org/10.1016/S0223-5234\(03\)00100-4](https://doi.org/10.1016/S0223-5234(03)00100-4)
- Brisson, N., Mary, B., Ripoche, D., Jeuffroy, M.H., Ruget, F., Nicoulaud, B., Gate, P., Devienne-Baret, F., Antonioletti, R., Durr, C., Richard, G., Beaudoin, N., Recous, S., Tayot, X., Plenet, D., Cellier, P., Machet, J.M., Meynard, J.M., Delécolle, R., 1998. STICS: a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. I. Theory and parameterization applied to wheat and corn. *Agronomie* 18, 311–346.
- Casenave, A., Valentin, C., 1989. Les états de surface de la zone sahélienne : influence sur l’infiltration, ORSTOM. ed. Institut français de recherche scientifique pour le développement en Coopération, Paris (France).
- Cassman, K.G., Dobermann, A.R., Walters, D.T., 2002. Agroecosystems, Nitrogen-use Efficiency, and Nitrogen Management. *Agron. Hortic. Fac. Publ.* 31, 132–140.
- Castrignano, A., Di Bari, V., Stelluti, M., 1997. Evapotranspiration predictions of CERES-Sorghum in Southern Italy model. *Eur. J. Agron.* 6, 265–274. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(97\)00002-6](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(97)00002-6)
- Challinor, A., Wheeler, T., Garforth, C., Craufurd, P., Kassam, A., 2007. Assessing the vulnerability of food crop systems in Africa to climate change. *Clim. Change* 83, 381–399.
- Chantereau, J., Nicou, R., 1991. Le Sorgho, Maisonneuv. ed. Paris, France.

- Chepng'etich, E., Bett, E.K., Nyamwaro, S.O., Kizito, K., 2014. Analysis of Technical Efficiency of Sorghum Production in Lower Eastern Kenya : A Data Envelopment Analysis (DEA) approach . *J. Econ. Sustain. Dev.* 5, 58–65.
- Chipanshi, A.C., Chanda, R., Totolo, O., 2003. Vulnerability assessment of the maize and sorghum crops to climate change in Botswana. *Clim. Chang.* 61, 339–360.
- CIRAD, 2002. *Memento de l'agronome*. Paris, France.
- Coughlan, M., 1987. Monitoring drought in Australia, in: Wilhite, D.A., Easterling, W.E., Wood, D.A. (Eds.), *Planning for Drought*. Colorado, p. 597.
- De Datta, S.K., 1986. Improving nitrogen fertilizer efficiency in lowland rice in tropical Asia, in: De Datta, S.K., Patrick, W.H. (Eds.), *Nitrogen Economy of Flooded Rice Soils. Developments in Plant and Soil Sciences*. Springer, Dordrecht, pp. 190–197.
https://doi.org/10.1007/978-94-009-4428-2_10
- De Datta, S.K., Buresh, R.J., 1989. Integrated nitrogen management in irrigated rice, in: Stewart, B.A. (Ed.), *Advances in Soil Science*. Springer, New York, NY, pp. 143–169.
- De Datta, S.K., Obcemea, W.N., Jana, R.K., 1972. Protein content of rice grain as affected by nitrogen fertilizer and some triazines and substituted ureas. *Agron. J.* 64, 785–788.
<https://doi.org/10.2134/agronj1972.00021962006400060024x>
- de Wet, J.M., Huckabay, J.P., 1967. The origin of sorghum bicolor. II. Distribution and domestication. *Evolution (N. Y.)* 21, 787–802.
- Defrance, D., Ramstein, G., Charbit, S., Vrac, M., Famien, A.M., Sultan, B., Swingedouw, D., Dumas, C., Gemenne, F., Alvarez-Solas, J., Vanderlinden, J.-P., 2017. Consequences of rapid ice-sheet melting on the Sahelian population vulnerability. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 114, 6533–6538. <https://doi.org/10.1073/pnas.1619358114>
- Dehaynin, N., 2007. *Utilisation du sorgho en alimentation animale*. Lyon, France.
- Dominy, C.S., Haynes, R.J., 2002. Influence of agricultural land management on organic matter content, microbial activity and aggregate stability in the profiles of two Oxisols. *Biol. Fertil. Soils* 36, 298–305. <https://doi.org/10.1007/s00374-002-0542-9>
- Dzotsi, K.A., Jones, J.W., Adiku, S.G.K., Naab, J.B., Singh, U., Porter, C.H., Gijsman, A.J., 2010. Modeling soil and plant phosphorus within DSSAT. *Ecol. Modell.* 221, 2839–2849. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2010.08.023>
- Ehdaie, B., Waines, J.G., 2001. Sowing date and nitrogen rate effects on dry matter and nitrogen partitioning in bread and durum wheat. *F. Crop. Res.* 73, 47–61.
[https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(01\)00181-2](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(01)00181-2)
- Elmi, A.A., Madramootoo, C., Egeh, M., Liu, A., Hamel, C., 2002. Environmental and agronomic implications of water table and nitrogen fertilization management. *J. Environ. Qual.* 31, 1858–1867. <https://doi.org/10.2134/jeq2002.1858>
- Fageria, N.K., Baligar, V.C., 1999. Yield and yield components of lowland rice as influenced by timing of nitrogen fertilization. *J. Plant Nutr.* 22, 23–32.
<https://doi.org/10.1080/01904169909365603>
- Falkenmark, M., 1989. The massive water scarcity now threatening Africa: Why isn't it being addressed? *Ambio* 18, 112–118.

- FAOSTAT, 2016. Trade data base, Production data. <https://faostat.fao.org>. URL <https://faostat.fao.org> (accessed 9.18.18).
- Feller, C.L., Thuriès, L.J.M., Manlay, R.J., Robin, P., Frossard, E., 2003. The principles of rational agriculture by Albrecht Daniel Thaer (1752-1828). An approach to the sustainability of cropping systems at the beginning of the 19th century. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 166, 687–698. <https://doi.org/10.1002/jpln.200321233>
- Fischer, R.A., 1993. Irrigated spring wheat and timing and amount of nitrogen fertilizer . II . Physiology of grain yield response. *F. Crop. Res.* 33, 57–80. [https://doi.org/10.1016/0378-4290\(93\)90094-4](https://doi.org/10.1016/0378-4290(93)90094-4)
- Fu, T., Ko, J., Wall, G.W., Pinter, P.J., Kimball, B.A., Ottman, M.J., Kim, H., 2016. Simulation of climate change impacts on grain sorghum production grown under free air CO₂ enrichment. *Int. Agrophysics* 30, 311–322. <https://doi.org/10.1515/intag-2016-0007>
- Gagnon, B., Ziadi, N., 2010. Grain corn and soil nitrogen responses to sidedress nitrogen sources and applications. *Agron. J.* 102, 1014–1022. <https://doi.org/10.2134/agronj2010.0011>
- Ganyo, K., Muller, B., Hoogenboom, G., Adam, M., 2016. Modeling sorghum and millet genotypes responses to several fertilizer applications in order to optimize fertilizers use according to climate, Poster material presented at AgMIP6, 28-30 June, 2016. Montpellier, France.
- Garrido-Lestache, E., Lopez-Bellido, R.J., Lopez-Bellido, L., 2005. Durum wheat quality under Mediterranean conditions as affected by N rate, timing and splitting, N form and S fertilization. *Eur. J. Agron.* 23, 265–278. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2004.12.001>
- Garrido-Lestache, E., López-Bellido, R.J., López-Bellido, L., 2004. Effect of N rate, timing and splitting and N type on bread-making quality in hard red spring wheat under rainfed Mediterranean conditions. *F. Crop. Res.* 85, 213–236. [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(03\)00167-9](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(03)00167-9)
- Gerstenmier, A., Choho, T., 2015. Fourniture d'intrants agricoles. Dakar (Sénégal).
- Gheysari, M., Mirlatifi, M.S., Bannayan, M., Homae, M., Hoogenboom, G., 2009. Interaction of water and nitrogen on maize grown for silage. *Agric. Water Manag.* 96, 809–821. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2008.11.003>
- Giller, K.E., Tittonell, P., Rufino, M.C., van Wijk, M.T., Zingore, S., Mapfumo, P., Adjei-Nsiah, S., Herrero, M., Chikowo, R., Corbeels, M., Rowe, E.C., Baijukya, F., Mwijage, A., Smith, J., Yeboah, E., van der Burg, W.J., Sanogo, O.M., Misiko, M., de Ridder, N., Karanja, S., Kaizzi, C., K'ungu, J., Mwale, M., Nwaga, D., Pacini, C., Vanlauwe, B., 2011. Communicating complexity: Integrated assessment of trade-offs concerning soil fertility management within African farming systems to support innovation and development. *Agric. Syst.* 104, 191–203. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2010.07.002>
- Godwin, D.C., Singh, U., 1998. Nitrogen balance and crop response to nitrogen in upland and lowland cropping systems, in: Tsuji, G.Y., Hoogenboom, G., Thornton, P.K. (Eds.), *Understanding Options for Agricultural Production, Systems Approaches for Sustainable Agricultural Development*. Springer, The Netherlands, pp. 55–77. <https://doi.org/10.1007/978-94-017-3624-4>
- Graef, F., Haigis, J., 2001. Spatial and temporal rainfall variability in the Sahel and its effects

- on farmers' management strategies. *J. Arid Environ.* 48, 221–231.
<https://doi.org/10.1006/jare.2000.0747>
- Grossi, C.M., Justino, F., Andrade, T.C. de L., Santos, A.E., Rodrigues, A.R., Costa, L.C., 2013. Modeling the impact of global warming on the sorghum sowing window in distinct climates in Brazil. *Eur. J. Agron.* 51, 53–64. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2013.07.002>
- Gueye, T., Sine, B., Cisse, N., Diatta, C., Ndiaye, S., 2016. Characterization of Phenotypic Diversity of Sorghum Collection for Developing Breeding Material. *Int. J. Sci.* 5, 38–48. <https://doi.org/10.18483/ijSci.931>
- Gupta, V.V.S.R., Germida, J.J., 1988. Distribution of microbial biomass and its activity in different soil aggregate size classes as affected by cultivation. *Soil Biol. Biochem.* 20, 777–786. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0038-0717\(88\)90082-X](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0038-0717(88)90082-X)
- Habindavyi, E., 2009. Morphological characterisation of sorghum (*Sorghum bicolor*) diversity in Burundi. Uppsala (Burundi).
- Hammer, G.L., Chapman, S., Van Oosterom, E., Podlich, D.W., 2005. Trait physiology and crop modelling as a framework to link phenotypic complexity to underlying genetic systems. *Aust. J. Agric. Res.* 56, 947–960. <https://doi.org/10.1071/AR05157>
- Hanks, R.J., Klute, A., Breseler, E., 1969. A numeric method for estimating infiltration, redistribution, drainage, and evaporation of Water from Soil. *Water Resour. Res.* 5, 1064–1069.
- Hansen, J.W., 2002. Realizing the potential benefits of climate prediction to agriculture: issues, approaches, challenges. *Agric. Syst.* 74, 309–330. [https://doi.org/10.1016/S0308-521X\(02\)00043-4](https://doi.org/10.1016/S0308-521X(02)00043-4)
- Hao, B., Xue, Q., Bean, B.W., Rooney, W.L., Becker, J.D., 2014. Biomass production, water and nitrogen use efficiency in photoperiod-sensitive sorghum in the Texas High Plains. *Biomass and Bioenergy* 62, 108–116. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.01.008>
- Hirche, A., Boughani, A., Salamani, M., 2007. Évolution de la pluviosité annuelle dans quelques stations arides algériennes. *Sécheresse* 18 (4), 314–320.
- Hoogenboom, G., Jones, J.W., Wilkens, P.W., Porter, C.H., Boote, K.J., Hunt, L.A., Singh, U., Lizaso, J.L., White, J.W., Uryasev, O., Royce, F.S., Ogoshi, R., Gijsman, A.J., Tsuji, G.Y., 2015. Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT) Version 4.6.
- Hoogenboom, G., Jones, J.W., Wilkens, P.W., Porter, C.H., Boote, K.J., Hunt, L.A., Singh, U., Lizaso, J.L., White, J.W., Uryasev, O., Royce, F.S., Ogoshi, R., Gijsman, A.J., Tsuji, G.Y., 2010. Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT) Version 4.5.
- Hoogenboom, G., Porter, C.H., Shelia, V., Boote, K.J., Singh, U., White, J.W., Hunt, L.A., Ogoshi, R., Lizaso, J.I., Koo, J., Asseng, S., Singels, A., Moreno, L.P., Jones, J.W., 2017. Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT) Version 4.7 (<https://DSSAT.net>).
- Hoogenboom, G., Wilkens, P.W., Thornton, P.K., Jones, J.W., Hunt, L.A., Imamura, D.T., 1999. Decision support system for agrotechnology transfer v3.5, in: Hoogenboom, G., Wilkens, P.W., Tsuji, G.Y. (Eds.), *DSSAT Version 3*, Vol. 4 (ISBN 1-886684-04-9). University of Hawaii, Honolulu, HI, pp. 1–36.

- Hucklesby, D.P., Brown, C.M., Howell, S.E., Hageman, R.H., 1971. Late Spring applications of nitrogen for efficient utilization and enhanced production of grain and grain protein of wheat1. *Agron. J.* 63, 274–276.
<https://doi.org/10.2134/agronj1971.00021962006300020023x>
- Hulme, M., Doherty, R., Ngara, T., New, M., Lister, D., 2001. African climate change : 1900 – 2100. *Clim. Res.* 17, 145–168. <https://doi.org/10.3354/cr017145>
- IBSNAT (International Benchmark Sites Network for Agrotechnology Transfer), 1993. The IBSNAT Decade.
- Ines, A.V.M., Droogers, P., Makin, I.W., Gupta, A. Das, 2001. Crop growth and soil water balance modeling to explore water management options (No. 22). Colombo, Sri Lanka.
- Ingram, K.T., Roncoli, M.C., Kirshen, P.H., 2002. Opportunities and constraints for farmers of west Africa to use seasonal precipitation forecasts with Burkina Faso as a case study. *Agric. Syst.* 74, 331–349. [https://doi.org/10.1016/S0308-521X\(02\)00044-6](https://doi.org/10.1016/S0308-521X(02)00044-6)
- IPCC, 2014. Climate Change 2014: Synthesis Report, Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324>
- IPCC, 2007. Climate change 2007: Impacts, Adaptations and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK.
- Irz, X., Roe, T., 2000. Can the world feed itself? Some insights from growth theory. *Agrekon* 39, 513–528. <https://doi.org/10.1080/03031853.2000.9523669>
- Jain, M., Chourey, P.S., Boote, K.J., Allen, L.H., 2010. Short-term high temperature growth conditions during vegetative-to-reproductive phase transition irreversibly compromise cell wall invertase-mediated sucrose catalysis and microspore meiosis in grain sorghum (*Sorghum bicolor*). *J. Plant Physiol.* 167, 578–582.
<https://doi.org/10.1016/j.jplph.2009.11.007>
- Jing, Q., Bélanger, G., Baron, V., Bonesmo, H., 2011. Modeling the biomass and harvest index dynamics of timothy. *Agron. J.* 103, 1397–1404.
<https://doi.org/10.2134/agronj2011.0095>
- Jones, C.A., Kiniry, J.R., 1986. CERES-Maize: A simulation model of maize growth and development, University. ed. Texas A&M.
- Jones, J.W., Hoogenboom, G., Porter, C.H., Boote, K.J., Batchelor, W.D., Hunt, L.A., Wilkens, P.W., Singh, U., Gijsman, A.J., Ritchie, J.T., 2003. The DSSAT cropping system model. *Eur. J. Agron.* 18, 235–265.
- Jones, J.W., Tsuji, G.Y., Hoogenboom, G., Hunt, L.A., Thornton, P.K., Wilkens, P.W., Imamura, D.T., Bowen, W.T., Singh, U., 1998. Decision support system for agrotechnology transfer; DSSAT v3, in: Hoogenboom, G., Thornton, P.K. (Eds.), *Understanding Options for Agricultural Production*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, the Netherlands, pp. 157–177. https://doi.org/10.1007/978-94-017-3624-4_8
- Jongkaewwattana, S., Geng, S., Brandon, M.D., Hill, J.E., 1993. Effect of Nitrogen and Harvest Grain Moisture on Head Rice Yield. *Agron. J.* 85, 1143–1146.
<https://doi.org/10.2134/agronj1993.00021962008500060009x>

- Kante, M., Rattunde, H.F.W., Leiser, W.L., Nebié, B., Diallo, B., Diallo, A., Touré, A.O., Weltzien, E., Haussmann, B.I.G., 2017. Can tall guinea-race sorghum hybrids deliver yield advantage to smallholder farmers in West and Central Africa? *Crop Sci.* 57, 833–842. <https://doi.org/10.2135/cropsci2016.09.0765>
- Keating, B.A., Carberry, P.S., Hammer, M.E., Probert, M.E., Meinke, H., Hochman, Z., McLean, G., Verburg, K., Snow, V., Dimes, J.P., Silburn, M., Wang, E., Brown, S., Bristow, K.L., Asseng, S., Chapman, S., McCown, R.L., Freebairn, D.M., Smith, C.J., 2003. An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation. *Eur. J. Agron.* 18, 309–332. [https://doi.org/10.1016/S0223-5234\(03\)00100-4](https://doi.org/10.1016/S0223-5234(03)00100-4)
- Keating, B.A., Godwin, D.G., Watiki, J., 1991. Optimising nitrogen inputs in response to climatic risk, in: Muchow, R.C., Bellamy, J. (Eds.), *Climatic Risk in Crop Production- Models and Management for the Semi-Arid Tropics and Subtropics*. CAB International, Wallingford, pp. 329–358.
- Keating, B.A., Wafula, B.M., Watiki, J.M., Karanja, D.R., 1993. Dealing with Climatic Risk in Agricultural Research- A Case Study Modelling Maize in Semi-arid Kenya, in: Craswell, E.T., Simpson, J. (Eds.), *Soil Fertility and Climatic Constraints in Dryland Agriculture*. ACIAR, Harare (Zimbabwe), pp. 105–114.
- Kiani, M., Gheysari, M., Mostafazadeh-Fard, B., Majidi, M.M., Karchani, K., Hoogenboom, G., 2016. Effect of the interaction of water and nitrogen on sunflower under drip irrigation in an arid region. *Agric. Water Manag.* 171, 162–172. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.04.008>
- Kibunja, C.N., Mwaura, F.B., Mugendi, D.N., Wamae, D.K., Bationo, A., 2011. Long-term land management effects on crop yields and soil properties in the Sub-humid highlands of Kenya, in: Bationo, A., Waswa, B., Okeyo, J., Maina, F., Kihara, J. (Eds.), *Innovations as Key to the Green Revolution in Africa*. Springer, Dordrecht, pp. 169–174. <https://doi.org/10.1007/978-90-481-2543-2>
- Lacy, S.M., Cleveland, A., Soleri, D., 2006. Farmer choice of sorghum varieties in southern Mali. *Hum. Ecol.* 34, 331–353. <https://doi.org/10.1007/s10745-006-9021-5>
- Lepage, M., Bourgeois, G., 2012. *Modèles bioclimatiques pour la prédiction de la phénologie, de la croissance, du rendement et de la qualité des cultures*. CRAAQ, Quebec, Canada.
- Liu, J., Pattey, E., Miller, J.R., McNairn, H., Smith, A., Hu, B., 2010. Estimating crop stresses, aboveground dry biomass and yield of corn using multi-temporal optical data combined with a radiation use efficiency model. *Remote Sens. Environ.* 114, 1167–1177. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.01.004>
- Liu, Z., Hubbard, K.G., Lin, X., Yang, X., 2013. Negative effects of climate warming on maize yield are reversed by the changing of sowing date and cultivar selection in Northeast China. *Glob. Chang. Biol.* 19, 3481–3492. <https://doi.org/10.1111/gcb.12324>
- Lobell, D.B., Burke, M.B., 2010. On the use of statistical models to predict crop yield responses to climate change. *Agric. For. Meteorol.* 150, 1443–1452. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2010.07.008>
- López-Bellido, L., López-Bellido, R.J., Redondo, R., 2005. Nitrogen efficiency in wheat under rainfed Mediterranean conditions as affected by split nitrogen application. *F. Crop. Res.* 94, 86–97. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2004.11.004>

- Lopez, J.R., Erickson, J.E., Asseng, S., Bobeda, E.L., 2017. Modification of the CERES grain sorghum model to simulate optimum sweet sorghum rooting depth for rainfed production on coarse textured soils in a sub-tropical environment. *Agric. Water Manag.* 181, 47–55. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.11.023>
- Ma, B.L., Subedi, K.D., Costa, C., 2005. Comparison of crop-based indicators with soil nitrate test for corn nitrogen requirement. *Agron. J.* 97, 462–471. <https://doi.org/10.2134/agronj2005.0462>
- MacCarthy, D., Vlek, P., 2012. Impact of climate change on sorghum production under different nutrient and crop residue management in semi-arid region of Ghana: A modeling perspective. *African Crop Sci. J.* 20, 243–259. <https://doi.org/10.4314/acsj.v20i2>.
- MacCarthy, D.S., Akponikpe, P.B.I., Narh, S., Tegbe, R., 2015. Modeling the effect of seasonal climate variability on the efficiency of mineral fertilization on maize in the coastal savannah of Ghana. *Nutr. Cycl. Agroecosystems* 102, 45–64. <https://doi.org/10.1007/s10705-015-9701-x>
- MacCarthy, D.S., Kihara, J., Masikati, P., Adiku, S.G.K., 2018. Decision support tools for site-specific fertilizer recommendations and agricultural planning in selected countries in sub-Saharan Africa, in: Bationo, A., Ngaradoun, D., Youl, S., Lompo, F., Fening, J. (Eds.), *Improving the Profitability, Sustainability and Efficiency of Nutrients Through Site Specific Fertilizer Recommendations in West Africa Agro-Ecosystems*. Springer, Cham, pp. 343–359. <https://doi.org/10.1007/s10705-017-9877-3>
- MacCarthy, D.S., Sommer, R., Vlek, P.L.G., 2009. Modeling the impacts of contrasting nutrient and residue management practices on grain yield of sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) in a semi-arid region of Ghana using APSIM. *F. Crop. Res.* 113, 105–115. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2009.04.006>
- MacCarthy, D.S., Vlek, P.L.G., Bationo, A., Tabo, R., Fosu, M., 2010. Modeling nutrient and water productivity of sorghum in smallholder farming systems in a semi-arid region of Ghana. *F. Crop. Res.* 118, 251–258. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2010.06.005>
- MAE/DA, 2001. *La culture et la production du mil et sorgho au Sénégal: bilan-diagnostic et perspectives*.
- Masih, I., Maskey, S., Mussá, F.E.F., Trambauer, P., 2014. A review of droughts on the African continent: A geospatial and long-term perspective. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 18, 3635–3649. <https://doi.org/10.5194/hess-18-3635-2014>
- Mayer, D.G., Bulter, D.G., 1993. Statistical validation. *Ecol. Modell.* 68, 21–32.
- McCown, R.L., Hammer, G.L., Hargreaves, J.N.G., Holzworth, D.P., Freebairn, D.M., 1996. APSIM: a Novel Software System for Model Development, Model Testing and Simulation in Agricultural Systems Research. *Agric. Syst.* 50, 255–271.
- McCown, R.L., Wafula, B.M., Mohammed, L., Ryan, J.G., Hargreaves, J.N.G., 1991. Assessing the value of a seasonal rainfall predictor to agronomic decisions: the case of response farming in Kenya, in: Muchow, R.C., Bellamy, J.A. (Eds.), *Climatic Risk in Crop Production. Models and Management for the Semi-Arids Tropics and Subtropics*. CAB International, Wallingford, pp. 383–409.
- McGuire, S., 2002. Farmers' views and management of sorghum diversity in Western

- Harerghe, Ethiopia : Implications for collaboration with formal breeding, in: Cleveland, D.A., Soleri, D. (Eds.), Collaborative Plant Breeding: Integrating Farmers' and Plant Breeders' Knowledge and Practice. CAB International, Oxon, UK, pp. 107–135.
- McIntosh, M.S., 1983. Analysis of combined experiments. *Agron. J.* 75, 153–155. <https://doi.org/10.2134/agronj1983.00021962007500010041x>
- Mi, G., Tang, L., Zhang, F., Zhang, J., 2000. Is nitrogen uptake after anthesis in wheat regulated by sink size? *F. Crop. Res.* 68, 183–190. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(00\)00119-2](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0378-4290(00)00119-2)
- Miller, A.N., Ottman, M.J., 2010. Irrigation frequency effects on growth and ethanol yield in sweet sorghum. *Agron. J.* 102, 60–70. <https://doi.org/10.2134/agronj2009.0191>
- Moisier, A.R., Syers, K.J., Freney, J.R., 2004. Nitrogen fertilizer: An essential component of increased food, feed and fiber production, in: Moisier, A.R., Syers, K.J., Freney, J.R. (Eds.), Agriculture and the Nitrogen Cycle: Assessing the Impacts of Fertilizer Use on Food Production and the Environment. pp. 3–15.
- Mon, J., Bronson, K.F., Hunsaker, D.J., Thorp, K.R., White, J.W., French, A.N., 2016. Interactive effects of nitrogen fertilization and irrigation on grain yield, canopy temperature, and nitrogen use efficiency in overhead sprinkler-irrigated durum wheat. *F. Crop. Res.* 191, 54–65. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.02.011>
- Monteith, J.L., 1977. Climate and the efficiency of crop production in Britain. *Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci.* 281, 277–294. <https://doi.org/10.1098/rstb.1977.0140>
- Morel, R., 1989. Les sols cultivés, Lavoisier. ed. Paris, France.
- Mullen, R.W., Freeman, K.W., Raun, W.R., Johnson, G. V., Stone, M.L., Solie, J.B., 2003. Identifying an in-season response index and the potential to increase wheat yield with nitrogen. *Agron. J.* 95, 347–351. <https://doi.org/10.2134/agronj2003.0347>
- Nishizawa, N., Kitahara, I., Noguchi, T., Hareyama, S., Honjyo, K., 1977. Protein quality of high protein rice obtained by spraying urea on leaves before harvest. *Agric. Biol. Chem.* 41, 477–485. <https://doi.org/10.1080/00021369.1977.10862523>
- Nyembo, L.K., Useni, Y.S., Chukiyabo, M.K., Tshomba, K., Ntumba, F.N., Muyambo, E.M., Kapalanga, P.K., Mubemba, M., Bugeme, M.D., Baboy, L.L., 2013. Rentabilité économique du fractionnement des engrais azotés en culture de maïs (*Zea mays* L.) : cas de la ville de Lubumbashi, sud-est de la RD Congo. *J. Appl. Biosci.* 65, 4945–4956.
- Nyle, C., Ray, R.W., 2008. The nature and properties of soils, Fourteenth. ed.
- Omotosho, J.B., Balogun, A.A., Ogunjobi, K., 2000. Predicting monthly and seasonal rainfall, onset and cessation of the rainy season in West Africa using only surface data. *Int. J. Climatol.* 20, 865–880. [https://doi.org/10.1002/1097-0088\(20000630\)20:8<865::AID-JOC505>3.0.CO;2-R](https://doi.org/10.1002/1097-0088(20000630)20:8<865::AID-JOC505>3.0.CO;2-R)
- Ozer, P., Hountondji, Y., Niang, A.J., Karimoune, S., Laminou, M.O., Salmon, M., 2010. Désertification au Sahel : historique et perspectives. *Bull. la Société Géographique Liège* 54, 69–84.
- Perez, C.M., Juliano, B., Liboon, S.P., Alcantara, J.M., Cassman, K.G., 1996. Effects of late nitrogen fertilizer application on head rice yield, protein content, and grain quality of rice. *Cereal Chem.* 73, 556–560.

- Powlson, D.S., Poulton, P.R., Møller, N.E., Hewitt, M. V, Penny, A., Jenkinson, D.S., 1989. Uptake of foliar-applied urea by winter wheat (*Triticum aestivum*): The influence of application time and the use of a new ¹⁵N technique. *J. Sci. Food Agric.* 48, 429–440. <https://doi.org/10.1002/jsfa.2740480405>
- Prihar, S.S., Gajri, P.R., Bendi, D.K., Arora, V., 2000. *Intensive Cropping: Efficient Use of Water, Nutrients and Tillage*. The Food Press, New York.
- Pushman, F.M., Bingham, J., 1976. The effects of a granular nitrogen fertilizer and a foliar spray of urea on the yield and bread-making quality of ten winter wheats. *J. Agric. Sci.* 87, 281–292. <https://doi.org/10.1017/S0021859600027556>
- R Development Core Team, 2017. *R: A language and Environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria.
- Rani, P.L., Sreenivas, G., Reddy, D.R., 2014. Application of CSM-CERES-Maize model to define a sowing window and nitrogen rates for rainfed maize in semi-arid environment. *Int. J. Bio-resource Stress Manag.* 5, 181. <https://doi.org/10.5958/0976-4038.2014.00553.3>
- Ray, D.K., Gerber, J.S., Macdonald, G.K., West, P.C., 2015. Climate variation explains a third of global crop yield variability. *Nat. Commun.* 6, 1–9. <https://doi.org/10.1038/ncomms6989>
- Rinaldi, M., 2004. Water availability at sowing and nitrogen management of durum wheat: A seasonal analysis with the CERES-Wheat model. *F. Crop. Res.* 89, 27–37. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2004.01.024>
- Ritchie, J., 1998. Soil water balance and plant water stress, in: Tsuji, G.Y., Hoogenboom, G., Thornton, P.K. (Eds.), *Understanding Options for Agricultural Production, Systems Approaches for Sustainable Agricultural Development*. Springer, The Netherlands, pp. 41–54. <https://doi.org/10.1007/978-94-017-3624-4>
- Ritchie, J.T., Otter, S., 1985. Description and performance of CERES-Wheat: A user-oriented wheat yield model, in: Willis, W.O. (Ed.), *ARS Wheat Yield Project*. ARS-38. National Technical Information Service, VA, pp. 159–175.
- Rosenzweig, C., Jones, J.W., Hatfield, J.L., Ruane, A.C., Boote, K.J., Thorburn, P., Antle, J.M., Nelson, G.C., Porter, C., Janssen, S., Asseng, S., Basso, B., Ewert, F., Wallach, D., Baigorria, G., Winter, J.M., 2013. The Agricultural Model Intercomparison and Improvement Project (AgMIP): Protocols and pilot studies. *Agric. For. Meteorol.* 170, 166–182. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.09.011>
- Rötter, R., Van Keulen, H., 1997. Variations in yield response to fertilizer application in the tropics: II. Risks and opportunities for smallholders cultivating maize on Kenya's arable land. *Agric. Syst.* 53, 69–95. [https://doi.org/10.1016/S0308-521X\(96\)00037-6](https://doi.org/10.1016/S0308-521X(96)00037-6)
- Roudier, P., Sultan, B., Quirion, P., Baron, C., Alhassane, A., Traoré, S.B., Muller, B., 2011. An ex-ante evaluation of the use of seasonal climate forecasts for millet growers in SW Niger. *Int. J. Climatol.* 32, 759–771. <https://doi.org/10.1002/joc.2308>
- Salack, S., Muller, B., Gaye, A.T., 2011. Rain-based factors of high agricultural impacts over Senegal. Part I: Integration of local to sub-regional trends and variability. *Theor. Appl. Climatol.* 106, 1–22. <https://doi.org/10.1007/s00704-011-0414-z>
- Sanchez, P.A., Shepherd, K.D., Soule, M.J., Place, F.M., Buresh, R.J., Izac, A.-M.N., 1997.

- Soil fertility replenishment in Africa: an investment in natural resource capital, in: Buresh, R.J., Sanchez, P.A., Calhoun, F. (Eds.), *Replenishing Soil Fertility in Africa*. Madison, Wisconsin, pp. 1–46. <https://doi.org/10.2136/sssaspecpub51.c1>
- Scherer, H.W., Goldbach, H.E., Clemens, J., 2003. Potassium dynamics in the soil and yield formation in a long-term field experiment. *Plant, Soil Environ.* 49, 531–535.
- Schmidhuber, J., Tubiello, F.N., 2007. Global food security under climate change. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 104, 19703–19708. <https://doi.org/10.1073/pnas.0701976104>
- Seetanun, W., De Datta, S.K., 1973. Grain Yield, Milling Quality, and Seed Viability of Rice as Influenced by Time of Nitrogen Application and Time of Harvest1. *Agron. J.* 65, 390–394. <https://doi.org/10.2134/agronj1973.00021962006500030012x>
- Sincik, M., Goksoy, A.T., Dogan, R., 2013. Responses of sunflower (*Helianthus annuus* L .) to irrigation and nitrogen fertilization rates. *Zemdirbyste-Agriculture* 100, 151–158. <https://doi.org/10.13080/z-a.2013.100.019>
- Singh, U., Brink, J.E., Thornton, P.K., Christianson, C.B., 1993. Linking crop models with a geographic information system to assist decisionmaking : a prototype for the Indian semiarid tropics, IFDC Paper Series P-19. International Fertilizer Development Center (IFDC), Muscle Shoals, AL.
- Slingo, J.M., Challinor, A.J., Hoskins, B.J., Wheeler, T.R., 2005. Introduction: food crops in a changing climate. *Philos. Trans. R. Soc. B* 360, 1983–1989. <https://doi.org/10.1098/rstb.2005.1755>
- Smalberger, S.A., Singh, U., Chien, S.H., Henao, J., Wilkens, P.W., 2006. Development and validation of a phosphate rock decision support system. *Agron. J.* 98, 471–483. <https://doi.org/10.2134/agronj2005.0244>
- Smith, C.J., Freney, J.R., Shelock, R.R., Galbally, I.E., 1991. The fate of urea nitrogen applied in a foliar spray to wheat at heading. *Fertil. Res.* 28, 129–138.
- Spiertz, J.H.J., Ellen, J., 1978. Effects of nitrogen on crop development and grain growth of winter wheat in relation to assimilation and utilization of assimilates and nutrients. *Netherlands Journal of Agric. Sci.* 26, 210–231.
- Spitters, C.J.T., Van Keulen, H., Van Kraalingen, D.W.G., 1989. A simple and universal crop growth simulator: SUCROS87, in: Rabbinge, R., Ward, S.A., van Laar, H.H. (Eds.), *Simulation and Systems Management in Crop Protection*, Simulation Monographs 32. Wageningen, pp. 147–181.
- Staggenborg, S.A., Vanderlip, R.L., 2005. Crop simulation models can be used as dryland cropping systems research tools. *Agron. J.* 97, 378–384.
- Stals, H., Inzé, D., 2001. When plant cells decide to divide. *Trends Plant Sci.* 6, 359–364. [https://doi.org/10.1016/S1360-1385\(01\)02016-7](https://doi.org/10.1016/S1360-1385(01)02016-7)
- Stewart, J.I., Faught, W.A., 1984. Response farming of maize and beans at Katumani, Machakos District, Kenya: recommendations, yield expectations, and economic benefits. *East African Agric. For. J.* 44, 29–51.
- Stöckle, C.O., Donatelli, M., Nelson, R., 2003. CropSyst, a cropping systems simulation model. *Eur. J. Agron.* 18, 289–307. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(02\)00109-0](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00109-0)
- Stockle, C.O., Martin, S.A., Campbell, G.S., 1994. CropSyst, a cropping systems simulation

- model: Water/nitrogen budgets and crop yield. *Agric. Syst.* 46, 335–359.
[https://doi.org/10.1016/0308-521X\(94\)90006-2](https://doi.org/10.1016/0308-521X(94)90006-2)
- Strong, W.M., 1982. Effect of late application of nitrogen on the yield and protein content of wheat. *Aust. J. Exp. Agric.* 54–61. <https://doi.org/10.1071/EA9820054>
- Sultan, B., Barbier, B., Fortilus, J., Mbaye, S.M., Leclerc, G., 2010. Estimating the potential economic value of seasonal forecasts in West Africa: A long-term Ex-Ante assessment in Senegal. *Am. Meteorol. Soc.* 2, 69–87. <https://doi.org/10.1175/2009WCAS1022.1>
- Sultan, B., Gaetani, M., 2016. Agriculture in West Africa in the Twenty-first Century: climate change and impacts scenarios, and potential for adaptation. *Front. Plant Sci.* 7, 1–20.
<https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01262>
- Taira, H., 1970. Effect of fertilizer on protein content in high yield rice. *Nippon Sakumotsu Gakkai Kiji* 39, 200–2003. <https://doi.org/10.1248/cpb.37.3229>
- Taira, H., Matsushima, S., Matsuzaki, A., 1970. Analysis of yield-determining process and its application to yield-prediction and culture development of lowland rice. XCII. Possibility of increasing yield and nutritional value of rice protein by nitrogen dressing. *Nippon Sakumotsu Gakkai Kiji* 39:33-40. *Nippon Sakumotsu Gakkai Kiji* 39, 1970.
- Tiemeyer, B., Kahle, P., Lennartz, B., 2006. Nutrient losses from artificially drained catchments in North-Eastern Germany at different scales. *Agric. Water Manag.* 85, 47–57. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2006.03.016>
- Tovignan, T.K., Luquet, D., Fonceka, D., Ndoeye, I., Trouche, G., Cisse, N., 2015. Assessment of the variability of Senegalese landraces for phenology and sugar yield components to broaden the genetic pool of multi-purpose sorghum. *Plant Genet. Resour.* 14, 121–131.
<https://doi.org/10.1017/S1479262115000155>
- Tran, T. Sen, Tremblay, G., 2000. Recovery ¹⁵N-labeled fertilizer by spring bread wheat at different N rates and application times. *Can. J. Soil Sci.* 80, 533–539.
<https://doi.org/10.4141/S99-098>
- Tran, T.S., Giroux, M., Cescas, M.P., 1997. Utilisation de l’engrais azote marque au ¹⁵N par le maïs selon les modes d’application et les doses d’azote. *Can. J. Soil Sci.* 77, 9–19.
- Trichet, P., Jolivet, C., Arrouays, D., Loustau, D., Bert, D., Ranger, J., 1999. Le maintien de la fertilité des sols forestiers landais dans le cadre de la sylviculture intensive du pin maritime. *Etude Gest. des Sols* 6, 197–214.
- Tsuji, G., Uehara, G., Balas, S., 1994. Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT) Version 3, Ibsnat. University of Hawaii, Honolulu, Hawaii.
- Tsuji, G.Y., 1998. Network management and information dissemination for agrotechnology transfer, in: Tsuji, G.Y., Hoogenboom, G., Thornton, P.K. (Eds.), *Understanding Options for Agricultural Production. Systems Approaches for Sustainable Agricultural Development*. pp. 367–381. https://doi.org/10.1007/978-94-017-3624-4_18
- Uehara, G., 1998. Synthesis, in: Tsuji, G., Hoogenboom, G., Thornton, P.K. (Eds.), *Understanding Options For Agricultural Production*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, p. 389.
- Uryasev, S., Theiler, U.A., Serraino, G., 2010. Risk-return optimization with different risk-aggregation strategies. *J. Risk Financ.* 11, 129–146.

<https://doi.org/10.1108/15265941011025161>

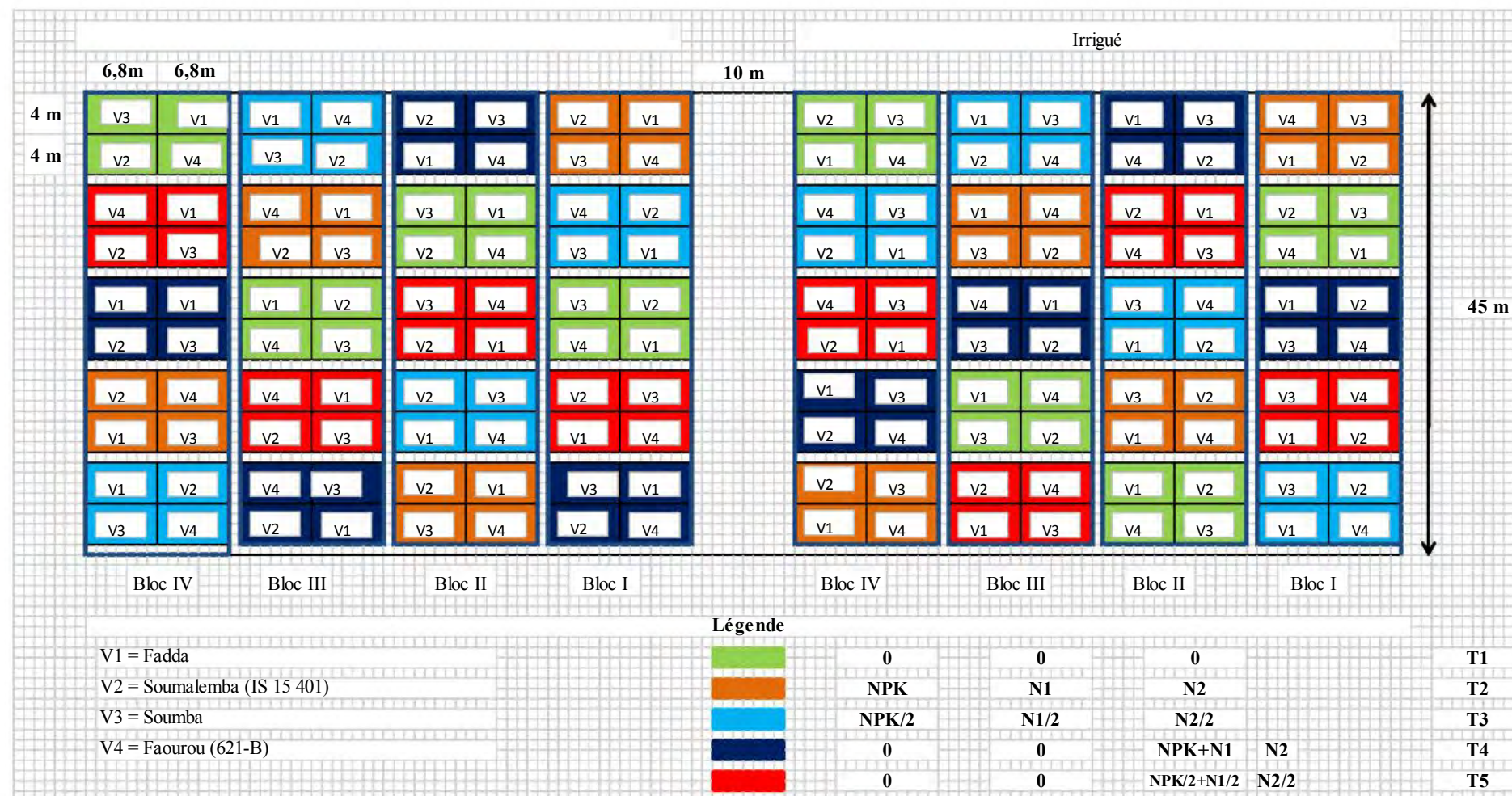
- Useni, S.Y., Baboy, L.L., Nyembo, K.L., Mpundu, M., 2012. Effets des apports combinés de biodéchets et de fertilisants inorganiques sur le rendement de trois variétés de *Zea mays* L. cultivées dans la région de Lubumbashi. *J. Appl. Biosci.* 3935–3943.
- Useni, Y.S., Mwema, A.L., Musambi, L., Chinawej, M.M.D., Nyembo, kimuni L., 2014. L'apport des faibles doses d'engrais minéraux permet-il d'accroître le rendement du maïs cultivé à forte densité ? Un exemple avec deux variétés de maïs à Lubumbashi. *J. Appl. Biosci.* 74, 6131–6140.
- Usman, M.T., Reason, C.J.C., 2004. Dry spell frequencies and their variability over southern Africa. *Clim. Res.* 26, 199–211. <https://doi.org/10.3354/cr026199>
- Valipour, M., 2015. Future of agricultural water management in Africa. *Arch. Agron. Soil Sci.* 61, 907–927. <https://doi.org/10.1080/03650340.2014.961433>
- van Duivenbooden, N., de Wit, C.T., van Keulen, H., 1996. Nitrogen, phosphorus and potassium relations in five major cereals reviewed in respect to fertilizer recommendations using simulation modelling. *Fertil. Res.* 44, 37–49. <https://doi.org/10.1007/BF00750691>
- van Keulen, H., van Beek, G.E.M., 1971. Water movement in layered soils - A simulation model. *Netherlands J. Agric. Sci.* 19, 138–153.
- van Sanford, D.A., MacKown, C.T., 1987. Cultivar differences in Nitrogen remobilization during grain fill in soft red winter wheat. *Crop Sci.* 27, 295–300. <https://doi.org/10.2135/cropsci1987.0011183X002700020035x>
- Vanderlip, R.L., 1993. How a sorghum plant develops. Kansas State University, Manhattan.
- Vanlauwe, B., Bationo, A., Chianu, J., Giller, K.E., Merckx, R., Mkwunye, U., Ohiokpehai, O., Pypers, P., Tabo, R., Shepherd, K.D., Smaling, E.M.A., Woomer, P.L., Sanginga, N., 2010. Integrated soil fertility management: Operational definition and consequences for implementation and dissemination. *Outlook Agric.* 39, 17–24. <https://doi.org/10.5367/000000010791169998>
- Velasco, J.L., Rozas, H.S., Echeverria, E., Barbieri, A.P., 2012. Optimizing fertilizer nitrogen use efficiency by intensively managed spring wheat in humid regions : Effect of split application. *Can. J. Plant Sci.* 92, 847–856. <https://doi.org/10.4141/CJPS2011-146>
- Wafula, B.M., McCown, R.L., Keating, B.A., 1992. Prospects for Improving Maize Productivity Through Response Farming, in: Probert, M.E. (Ed.), *A Search for Strategies for Sustainable Dryland Cropping in Semi-Arid Eastern Kenya*, Nairobi, 10-11 December 1990. ACIAR, pp. 101–107.
- Wenderof, F., Close, A.E., Schild, R., Wasylkova, K., Housley, R.A., Harlan, J.R., 1992. Saharan exploitation of plants 8,000 years BP. *Nature* 359.
- Weraduwege, S.M., Chen, J., Anozie, F.C., Morales, A., Weise, S.E., Sharkey, T.D., 2015. The relationship between leaf area growth and biomass accumulation in *Arabidopsis thaliana*. *Front. Plant Sci.* 6, 1–21. <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00167>
- White, J., Hoogenboom, G., Huda, S., Kimball, B., Ottman, M., Prasad, P. V, Rosenthal, W., Sanon, M., Staggenborg, S., Vaksman, M., Vanderlip, R., 2007. Recent advances in the CSM-CERES-Sorghum model, in: *Poster Material Presented at ASA-CSSA-SSSA*

- Annual Meeting. New Orleans, pp. 4–5.
- White, J.W., Alagarswamy, G., Ottman, M.J., Porter, C.H., Singh, U., Hoogenboom, G., 2015. An Overview of CERES–Sorghum as Implemented in the Cropping System Model Version 4.5. *Agron. J.* 107, 1987–2002. <https://doi.org/10.2134/agronj15.0102>
- White, J.W., Jones, J.W., Porter, C., McMaster, G.S., Sommer, R., 2010. Issues of spatial and temporal scale in modeling the effects of field operations on soil properties. *Oper. Res. Int. J.* 10, 279–299. <https://doi.org/10.1007/s12351-009-0067-1>
- Williams, J.R., Dyke, P.T., Jones, C.A., 1983. Epic - a model for assessing the effects of erosion on soil productivity. *Dev. Environ. Model.* 5, 553–572. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-444-42179-1.50065-1>
- Wilson, C.E., Wells, B.R., Norman, R.J., 1989. Seasonal Uptake Patterns of Fertilizer Nitrogen Applied in Split Applications to Rice. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 53, 1884–1887. <https://doi.org/10.2136/sssaj1989.03615995005300060045x>
- Wolf, J., van Keulen, H., 1989. Modeling long-term crop response to fertilizer and soil nitrogen. II. Comparison with field results. *Plant Soil* 120, 23–38.
- Woolfolk, C.W., Raun, W.R., Johnson, G. V., Thomason, W.E., Mullen, R.W., Wynn, K.J., Freeman, K.W., 2002. Influence of late-season foliar nitrogen application on yield and grain nitrogen in winter wheat. *Agron. J.* 94, 429–434.
- World Bank, 2005. *Agricultural Growth for the Poor : An agenda for development, Directions in Development.* Washington, DC. <https://doi.org/doi:10.1596/0-8213-6067-1>
- World Bank, 2000. *Spurring Agricultural and Rural Development, Can Africa claim the 21st century?* Washington, DC.
- Wu, E., Lenderts, B., Glassman, K., Berezowska-Kaniewska, M., Christensen, H., Asmus, T., Zhen, S., Chu, U., Cho, M.J., Zhao, Z.Y., 2014. Optimized Agrobacterium-mediated sorghum transformation protocol and molecular data of transgenic sorghum plants. *Vitr. Cell. Dev. Biol. - Plant* 50, 9–18. <https://doi.org/10.1007/s11627-013-9583-z>
- Wuest, S.B., Cassman, K.G., 1992. Fertilizer-Nitrogen use efficiency of irrigated wheat: I. Uptake efficiency of preplant versus late-season application. *Agron. J.* 84, 682–688.
- Xue, C., Erley, S.A.G., Rossmann, A., Schuster, R., Koehler, P., Mühling, K.-H., 2016. Split nitrogen application improves wheat baking quality by influencing protein composition rather than concentration. *Front. Plant Sci.* 7, 1–11. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00738>
- Yoshida, S., 1981. *Fundamentals of rice crop science*, IRRI. IRRI, Los Banos, Philippines.
- Zaongo, C.G., Wendt, C.W., Lascano, R.J., Juo, A.S., 1997. Interactions of water, mulch and nitrogen in Niger. *Plant Soil* 197, 119–126.
- Zebarth, B.J., Botha, E.J., Rees, H., 2007. Rate and time of fertilizer nitrogen application on yield, protein and apparent efficiency of fertilizer nitrogen use of spring wheat. *Can. J. Plant Sci.* 709–718.
- Ziadi, N., Bélanger, G., Cambouris, A.N., Tremblay, N., Nolin, M.C., Claessens, A., 2008. Relationship between phosphorus and nitrogen concentrations in spring wheat. *Agron. J.* 100, 80–86. <https://doi.org/10.2134/agronj2007.0119>

Zingore, S., Murwira, H.K., Delve, R.J., Giller, K.E., 2007. Influence of nutrient management strategies on variability of soil fertility, crop yields and nutrient balances on smallholder farms in Zimbabwe. *Agric. Ecosyst. Environ.* 119, 112–126.
<https://doi.org/10.1016/j.agee.2006.06.019>

Annexes

Annexe 1 : Plan d'essais à Nioro du Rip en 2015



Annexe 2 : Résultats ANOVA et ANCOVA

ANOVA

Analysis of Variance Table

Response: RDTagro

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Bloc	3	1550817	516939	2.114	0.09822 .
Environnement	5	46854053	9370811	38.317	< 2e-16 ***
Fertilisation	4	17911124	4477781	18.310	1.20e-13 ***
genotypes	3	2229026	743009	3.038	0.02918 *
Environnement:Fertilisation	20	9505835	475292	1.943	0.00944 **
Environnement:Variété	15	28687846	1912523	7.820	3.91e-15 ***
Fertilisation:genotypes	12	4135810	344651	1.409	0.15939
Environnement:Fertilisation:Variété	60	20198219	336637	1.376	0.04283 *
Residuals	343	83884212	244560		

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

ANCOVA

Analysis of Variance Table

Response: RDTagro

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Bloc	3	1387941	462647	1.8922	0.13062
Qlimon	1	27819692	27819692	113.7807	< 2.2e-16 ***
Environnement	4	19294501	4823625	19.7283	1.286e-14 ***
Fertilisation	4	17005599	4251400	17.3879	5.422e-13 ***
Variété	3	2151898	717299	2.9337	0.03353 *
Environnement:Fertilisation	20	9856187	492809	2.0156	0.00650 **
Environnement:Variété	15	28231670	1882111	7.6977	7.545e-15 ***
Fertilisation:Variété	12	4064458	338705	1.3853	0.17078
Environnement:Fertilisation:Variété	60	20097904	334965	1.3700	0.04536 *
Residuals	340	83130898	244503		

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Ganyo et al., J. Appl. Biosci. 2018 Optimisation du NPK et urée basée sur les informations climatiques pour accroître la production du sorgho en zones soudano-sahéliennes du Sénégal



Journal of Applied Biosciences 131: 13293 - 13307

ISSN 1997-5902

Optimisation du NPK et urée basée sur les informations climatiques pour accroître la production du sorgho en zones soudano-sahéliennes du Sénégal

Komla Kyky GANYO^{1,2,3*}, Bertrand MULLER^{1,4}, Espoir Koudjo GAGLO^{1,2}, Aliou GUISSÉ², Ndiaga CISSÉ¹ et Myriam ADAM^{4,5,6}

¹ Centre d'Étude Régional pour l'Amélioration de l'Adaptation à la Sécheresse (CERAAS), BP 3320, Route de Khombole, Thiès, Sénégal

² Département de Biologie Végétale, Université Cheikh Anta Diop de Dakar (UCAD), BP 5005, Dakar, Sénégal

³ Institut Togolais de Recherche Agronomique (ITRA), BP 1163, Lomé, Togo

⁴ Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD), UMR AGAP/PAM, 34090 Montpellier France

⁵ Institut de l'Environnement et de la Recherche Agricole (INERA), 01BP 910, Bobo Dioulasso, Burkina Faso

⁶ International Crops Research Institute for Semi-Arid Tropics (ICRISAT), BP 320, Bamako, Mali

*Auteur correspondant : desireganyo@gmail.com

Original submitted in on 10th August 2018. Published online at www.m.elewa.org on 30th November 2018
<https://doi.org/10.4314/jab.v13i11.5>

RÉSUMÉ

Objectif : L'objectif est d'étudier les réponses de variétés de sorgho à des apports contrastés de NPK et urée qui pourraient être dictés par les informations météorologiques.

Méthodologie et résultats : Des essais en split plot avec quatre répétitions ont été conduits à Nioro du Rip et Sinthiou Malème (Sénégal) sur sols sableux en conditions pluviales. Quatre variétés (Fadda, Faourou, Soumalembe et Soumba) ont été soumises à cinq modalités de fertilisation : T1 = pas d'engrais ; T2 = 150 kg/ha de NPK (15-15-15) à la levée + 50 kg/ha d'urée (46%) au tallage + 50 kg/ha d'urée à la montaison (recommandation au Sénégal pour le sorgho) ; T3 = moitié dose de T2 appliquée aux mêmes stades ; T4 = 150 kg/ha de NPK + 50 kg/ha d'urée à la montaison + 50 kg/ha d'urée à l'épiaison (T2 décalé) et T5 = moitié dose T4 apportée aux mêmes stades. La fertilisation tardive a permis aux plantes stressées, de recouvrir la croissance telle si les apports étaient faits tôt dans la saison. Les rendements ont varié suivant les localités. L'apport décalé de la dose recommandée (T4) a été plus bénéfique que la moitié dose décalée (T5). Les variétés ont montré des réponses différentes les unes des autres, avec Soumalembe qui a mieux réagi aux apports tardifs.

Conclusion et application des résultats : Il ressort de cette étude que la fertilisation tardive a été bénéfique aussi bien pour le grain que la biomasse. Elle reste une alternative à la gestion de fertilisation telle que recommandée ou pratiquée par les paysans en cas de début de saison de pluie non favorable surtout dans des pays agropastoraux comme le Sénégal. Les structures d'appui technique aux paysans devront intégrer les prévisions ou observations pluviométriques dans les recommandations de fertilisation afin d'optimiser l'efficacité des engrais et la productivité du sorgho.

Mots clés : NPK-urée, optimisation, variabilité pluviométrique, sorgho, Sénégal

Auteur : Komla Kyky GANYO

Etude et modélisation des réponses de variétés de sorgho (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) à des stratégies contrastées d'apports d'intrants

Résumé

La variabilité pluviométrique très importante des zones sahéliennes et soudano-sahéliennes et la déficience de leurs sols en nutriments impliquent des incertitudes sur la production du sorgho. L'objectif de cette thèse est de générer des conseils sur la fertilisation minérale aux agriculteurs en relation aux informations météorologiques. Cette étude a porté sur (i) l'étude en station des réponses de variétés de sorgho à différentes doses et périodes d'application de NPK (15-15-15) et urée, (ii) la calibration et évaluation du modèle de culture DSSAT dans la reproduction des réponses du sorgho à la fertilisation azotée, et (iii) l'exploration et définition de fenêtres optimales de premières applications d'engrais. Pour ce faire, 4 variétés de sorgho à maturité contrastée ont été soumises à 5 modalités de fertilisation dont deux tardives sous différents régimes pluviométriques à Nioro du Rip et Sinthiou Malème en 2015 et 2016. Sur la base des résultats de développement et croissance puis de rendements, le modèle DSSAT-CSM-CERES-Sorghum (DSSAT v4.7) a été calibré et évalué en conditions de stress minimal d'azote et d'eau puis en conditions de stress azoté contrastées (incluant des dates d'apport tardif). Enfin, l'outil d'analyse saisonnière du DSSAT a été utilisé pour explorer et définir les dates de fertilisation appropriées en cas de démarrage tardif de la pluviométrie à partir des données climatiques journalières de 67 ans. Les résultats montrent que les plants bénéficiaient de l'apport tardif mais cela dépendait de la teneur en N du site, de la quantité d'eau reçue après l'apport tardif et du cycle de la variété. En un démarrage tardif de la pluie, le producteur ne perd pas de biomasse ou de grains avec un report de la fertilisation jusqu'à 34 jours après semis. Les dates optimales pour une fertilisation tardive sont du 28-33 jas indépendamment de l'année et du cycle de la variété à Nioro du Rip. A Sinthiou Malème, elles sont pour une variété à maturité précoce comprises entre 19-29 jas, entre 22-27 jas pour une variété à maturité intermédiaire et entre 24-34 jas pour une variété à maturité tardive indépendamment de l'année. Ces dates correspondent au stade tallage à montaison pour les variétés de cycle court (85-95 jours) ou moyen (105-135 jours) et tallage pour les variétés de cycle long (>135 jours). L'effet du stress azoté lié à un apport tardif sur la production de grain simulée, était moins prononcé comparé aux données observées, ce qui nécessite une amélioration du DSSAT-CSM-CERES-Sorghum.

Mots clés : Variabilité pluviométrique, fertilisation tardive, Début de saison tardif, DSSAT-CSM-CERES-Sorghum, *Sorghum bicolor* ((L). Moench), Zones soudano-sahéliennes.

.....
Author: Komla Kyky GANYO

Study and modeling sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) varieties responses to contrasting strategies of fertilization

Abstract

In Sahelian and Sudano-Sahelian Zones, rainfall variability and soil nutrients deficiency affect sorghum production. This study aims at generating advices to farmers in relation with climate information. It focused on (i) the in-station study of sorghum varieties responses at different rates and application times of NPK (15-15-15) and urea (ii) calibration and evaluation of DSSAT crop model in the reproduction of sorghum responses to nitrogen fertilization and (iii) the exploration and definition of optimal windows for first fertilizer applications. Four contrasted sorghum varieties were submitted to five (5) fertilization applications including two (2) late fertilizer applications under different rainfall regimes in "Nioro du Rip" and "Sinthiou Malème". Based on development, growth and yields results, the DSSAT-CSM-CERES-Sorghum (DSSAT v4.7) model was calibrated and evaluated under minimal N and water stress conditions and under N stress conditions (including late application). The seasonal analysis tool was used to explore and identify the optimal fertilization dates in case of late start of rainfall based on 67-year daily climate data. Results showed that plants benefitted from late application. However, it depended on soil N content, water recorded after late application and variety. No loss of grain or biomass was recorded by delaying fertilizer application until 34 days after sowing. The optimal late fertilization dates are from 28 to 33 days after sowing (das) irrespective of the year and variety at Nioro du Rip. At Sinthiou Malème, they are from 19-29 das for early maturity varieties, from 22-27 das for intermediate maturity varieties and from 24-34 das for late maturity varieties irrespective of year. These dates correspond to tillering to stem extension stage for short (85-95 days) and medium (105-135days) cycle varieties and tillering for long (>135 days) cycle varieties. The effect of N stress related to late application on simulated grain was less pronounced compared to the observed data. This requires an improvement in DSSAT-CSM-CERES-Sorghum.

Key words: Rainfall variability, late fertilization, Late start of growing season, DSSAT-CSM-CERES-Sorghum, *Sorghum bicolor* ((L). Moench), Soudano-Sahelian zones.