

UNIVERSITÉ CHEIKH ANTA DIOP DE DAKAR



Ecole Doctorale Sciences de la Vie, de la Santé et de l'Environnement
Faculté des Sciences et Techniques

Année : 2013

N° d'ordre : 063

**Amélioration de la prévision des rendements du mil (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.)
au Sénégal par l'utilisation de modèles de culture : prise en compte de la sensibilité à
la photopériode des variétés et de la fertilité dans les parcelles d'agriculteurs**

**Thèse présentée et soutenue publiquement le 20 décembre 2013 pour obtenir le
Doctorat en Biologie, Physiologie et Pathologies végétales
Spécialité : Production et Protection des végétaux**

par

Patrice Koffi KOUAKOU

devant le jury composé de :

- Président :** Kandiora NOBA, Professeur titulaire (FST/UCAD, Sénégal)
- Rapporteurs :** Amadou Thierno GAYE, Professeur titulaire (ESP/UCAD, Sénégal)
Mbaye DIOP, Maître de recherches (LNRPV/ISRA, Sénégal)
- Examineurs :** Léonard Élie AKPO, Professeur titulaire (FST/UCAD, Sénégal)
Bertrand MULLER, Maître de recherches (UMR AGAP/CIRAD, France)
- Directeurs de thèse :** Aliou GUISSÉ, Professeur titulaire (FST/UCAD, Sénégal)
Nguettia René YAO, Maître de conférences (INP-HB, Côte d'Ivoire)

UNIVERSITÉ CHEIKH ANTA DIOP DE DAKAR



Ecole Doctorale Sciences de la Vie, de la Santé et de l'Environnement
Faculté des Sciences et Techniques

Année : 2013

N° d'ordre : 063

**Amélioration de la prévision des rendements du mil (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.)
au Sénégal par l'utilisation de modèles de culture : prise en compte de la sensibilité à
la photopériode des variétés et de la fertilité dans les parcelles d'agriculteurs**

Thèse présentée et soutenue publiquement le 20 décembre 2013 pour obtenir le
Doctorat en Biologie, Physiologie et Pathologies végétales
Spécialité : Production et Protection des végétaux

par

Patrice Koffi KOUAKOU

devant le jury composé de :

- Président :** Kandiora NOBA, Professeur titulaire (FST/UCAD, Sénégal)
- Rapporteurs :** Amadou Thierno GAYE, Professeur titulaire (ESP/UCAD, Sénégal)
Mbaye DIOP, Maître de recherches (LNRPV/ISRA, Sénégal)
- Examineurs :** Léonard Élie AKPO, Professeur titulaire (FST/UCAD, Sénégal)
Bertrand MULLER, Maître de recherches (UMR AGAP/CIRAD, France)
- Directeurs de thèse :** Aliou GUISSÉ, Professeur titulaire (FST/UCAD, Sénégal)
Nguettia René YAO, Maître de conférences (INP-HB, Côte d'Ivoire)

A la mémoire de mon père,
disparu beaucoup trop tôt.

A ma mère, brave femme africaine,
pour son amour et ses prières.

A ma fille Orlane Syntiche Mouahé,
pour la patience durant toutes ces années d'absence.

« *Essentially, all models are wrong, but some are useful.* »

George Edward Pelham Box (*October 18, 1919 – March 28, 2013*)

Avant-propos

Le travail qui fait l'objet de cette thèse a été réalisé au Centre d'Étude Régional pour l'Amélioration de l'Adaptation à la Sécheresse (CERAAS) de Thiès (Sénégal). Les activités ont été conduites dans le cadre du projet « WAAPP Agrométéorologie » du Programme de Productivité Agricole en Afrique de l'Ouest (PPAAO), financé par la banque mondiale et le Gouvernement du Sénégal.

Nombreuses sont les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à ce travail et à qui nous voudrions rendre hommage à travers ces quelques lignes.

Nous exprimons toute notre reconnaissance au Dr Bertrand Muller, Chercheur du CIRAD, du CERAAS et d'AfricaRice, coordonnateur du projet « WAAPP Agrométéorologie ». Dr Muller est à l'origine de notre thèse, de son orientation et ses évolutions et nous a encadré tout au long de celle-ci. Plus qu'un « encadrant principal », il fut un co-directeur implicite.

Nous sommes reconnaissant envers les Prs Aliou Guissé et René Nguettia Yao, respectivement directeur et co-directeur de cette thèse, pour leur disponibilité et leur contribution constructive au cours de ces 4 années d'études.

Nos remerciements les plus sincères sont au Pr Amadou Thierno Gaye et au Dr Mbaye Diop qui nous ont fait l'honneur d'être les rapporteurs de ce document, et qui ont bien voulu nous faire part de leurs pertinentes critiques et suggestions, et au Pr Léonard Élie Akpo qui nous a fait l'honneur d'être examinateur de notre travail.

Nos remerciements vont à l'endroit du Pr Saliou Ndiaye, recteur de l'Université Cheikh Anta Diop (UCAD) de Dakar, du Pr Abdoulaye Samb, directeur de l'École Doctorale Sciences de la Vie, de la Santé et de l'Environnement (ED-SEV) et du Pr Sérigne Ndiaye, doyen de la Faculté des Sciences et Techniques (FST), qui ont bien voulu nous accepter dans la formation doctorale « Production et Protection des Végétaux ».

Nous remercions les directeurs successifs du CERAAS, Drs Dogo Seck, Ousmane Ndoye et Ndiaga Cissé, qui nous ont accordé une grande confiance en nous accueillant dans le centre, et en nous intégrant dans un programme de recherche.

Nous sommes reconnaissant envers l'Office Allemand d'Échange Universitaire (DAAD) pour nous avoir accordé une bourse de thèse pendant 45 mois à travers sa collaboration avec le CERAAS. Nous encourageons les responsables du DAAD à continuer cette collaboration pour un bon développement de la recherche agricole en Afrique de l'ouest.

Nous remercions le Service de Coopération et d'Action Culturelle (SCAC) de l'Ambassade de France en Côte d'Ivoire qui nous a apporté son soutien sous forme de séjours de 5 mois en 2012 et en 2013 au Sénégal.

Nous aimerions remercier Drs François Affholder, Myriam Adam et Christian Baron, tous chercheurs du CIRAD à Montpellier, pour leur disponibilité et leur importante contribution scientifique à ce travail. François Affholder a mis à notre disposition sa base de données de suivis des parcelles des agriculteurs faits dans le cadre du projet ESPACE (1990-1991). Christian Baron a contribué à la mise au propre des données du programme AMMA (2006-2008) dont nous avons également bénéficiées. Myriam Adam a guidé nos « premiers pas » dans l'apprentissage du modèle DSSAT.

Il nous plait de remercier sincèrement Drs Amadou Abdoulaye Fall et Abdou Ndiaye, respectivement chefs des Centre de Recherches Agricoles (CRA) de Saint-Louis et Centre de Recherches Zootechniques (CRZ) de Kolda qui n'ont ménagé aucun effort pour nous permettre de conduire des expérimentations sur leurs stations.

Nos remerciements vont à l'endroit de nombreux chercheurs au Sénégal pour leur appui scientifique ou technique (fourniture de données météorologiques) au cours de cette thèse. Nous pensons aux Drs Daniel Foncéka et Bassirou Sine du CERAAS, Dr Mamadou Sall et M. Malick Ndiaye du CRA de Saint-Louis, M. Amadou Fofana du CRZ Kolda, M. Abdoulaye Sow et Dr Alpha Bocar Baldé d'AfricaRice à Saint-Louis.

Nous sommes reconnaissant aux nombreux techniciens qui ont significativement contribué à la collecte de données de terrain sur les différents sites d'étude. Nous citerons MM. Ibrahima Ndong, Abdou Faye, Amadou Diop, Pape Mamadou Ndiaye, Mor Fall, Malamine Badji et Moustapha Fall du CERAAS, Daniel Babène et Momar Sabaly du CRZ Kolda, Ndongo Ba et Magatte Dieye du CRA de Saint-Louis.

De nombreux stagiaires d'écoles d'agronomie au Sénégal ont également contribué à la collecte de données de terrain. Que Souleymane Diallo de l'ENSA de Thiès, Armang Ndiaga Sène, Rose Diambogne Diouf, Mamadou Sow, Idrissa Touré, Mamoudou Mansaly, Mbaye Sarr Diop de l'ENCR de Bambey, Moussa Faty, Abdoulaye Bouré Ngom, Mme Thiam née Sokhna Diagne du CNFTA/GR (ex EATA) de Ziguinchor et Bécaye Dramé du CFPH de Cambérène trouvent ici l'expression de notre reconnaissance.

Durant toutes ces années passées au CERAAS, nous avons eu à côtoyer des collègues thésards et des étudiants en master avec qui nous avons vécu de façon conviviale, et qui d'une manière ou d'une autre ont apporté leur contribution à ce travail. Nous faisons référence aux Drs Ambroise Siéné, Nouhoun Belko, Sali Bourou, Seyni Boureima, Seyni Salack, Lucie Toumnou Aba, à Mmes Aissata Ba-Thiam et Marème Niang-Belko, à MM. Roger Bayala, Hodo-Abalo Tossim, Nath Bogie, Aliou Faye, Bassiaka Ouattara, Thierry Tovignan, Paul Martial Kouadio Kouakou, Joël Romaric Nguempjop, Halimé Mahamat Hissene, Ndeye Bouba Mbengue, Sassoum Lo, Ndèye Fatou Dème et Mohamed Lamine Teketé.

Il nous est également agréable de remercier le personnel d'appui du CERAAS pour son soutien durant ces années passées au centre. Nous pensons à MM. Saliou Gning, Aly Égue Ka, Malick Ndiaye, Makha Dembelé et Jean-Michel Manga, tous chauffeurs du CERAAS, avec qui nous avons parcouru des milliers de kilomètres sur les routes et pistes villageoises, à M. Cheikhou Dramé et Mlle Khady Diop du service informatique, à M. Cheikh Faye du service reprographie, à Mlle Mariama Senghor, Mmes Thérèse Mané Faye-Faye, Fatou Guèye-Sall et Astou Faye-Guèye, à MM. Saibane Cissokho, Abdou Latif Diack, Moussa Ndoye, Idrissa Cissé, tous membres du personnel administratif et technique et Mme Sosso Faye, responsable de la cafétéria.

Je remercie également Cédric Ampoh pour ses remarques pertinentes lors de la relecture du manuscrit.

Je ne saurais terminer sans remercier de tout cœur les braves agriculteurs du BAOL, du SINE, du SALOUM, du SINE-SALOUM et du FOULADOU qui ont bien voulu mettre à notre disposition leurs champs pour les suivis-enquêtes, ainsi que les nombreux observateurs qui ont contribué à la collecte des données dans les parcelles, dont en particulier Adama Sène de Backfassagal. Pour paraphraser Montesquieu, je ne peux que dire : « **j'aime les paysans, ils ne sont pas assez savants pour raisonner de travers** ».

Résumé

La thèse a pour objectif de contribuer à améliorer la prévision des rendements du mil au Sénégal par l'utilisation de modèles de culture. Deux modèles écophysiologicals à base bilan hydrique (SARRA-H et CELSIUS) ont d'abord été calés et validés sur les principaux cultivars du Sénégal (Souna, Sanio, Thialack), dont la plupart sont photopériodiques. Des écarts importants entre rendements simulés et rendements des agriculteurs ont été observés dans l'utilisation de ces modèles pour la prévision en condition paysanne. L'analyse des écarts de rendement a révélé que ces écarts étaient dus en partie au faible niveau de fertilité des parcelles paysannes. Un modèle plus complexe, CERES-Millet, capable de gérer en plus l'interaction eau-fertilité, a donc été utilisé dans un second temps. Malgré de nombreux problèmes liés au calage de la biomasse et du développement de la surface foliaire, il a été correctement calé et validé en station sur le rendement en grain. Cependant, des écarts importants entre rendements simulés et rendements des agriculteurs subsistaient en condition paysanne. L'option de prendre en compte le faible niveau de fertilité des parcelles, à travers la baisse du facteur de fertilité (SLPF) de CERES-Millet, a permis d'obtenir des résultats acceptables et meilleurs que ceux obtenus en faisant baisser dans le même but le coefficient de conversion de l'énergie en biomasse de SARRA-H et de CELSIUS. Cependant, il conviendrait d'améliorer le fonctionnement de CERES-Millet et de poursuivre l'exploration des modalités d'ajustement du coefficient SLPF en fonction des conditions édaphiques en vue de bonnes prévisions.

Mots-clés : Modèle de culture, Photopériodisme, Prévision des rendements, Écarts de rendement, *Pennisetum glaucum* (L.) R. Br., Sénégal.

Abstract

This thesis aims to improve pearl millet yield forecasting by using crop models. Two water-balance ecophysiological models (SARRA-H and CELSIUS) were first calibrated and validated on the main pearl millet cultivars (Souna, Sanio, Thialack) of Senegal, of which most are photosensitive. But important yield gaps were observed between simulated yields and observed ones when the model was used under farmers' fields conditions. The yield gaps analysis revealed that low fertility levels of farmers' fields are responsible for the gaps. In order to reduce yield gaps, CERES-Millet which is a more complex model able to simulate water-nitrogen interaction, was then used. Despite several problems with the calibration of biomass and leaf area, the calibration of grain yield was satisfactory. CERES-Millet, was correctly calibrated and validated in research station conditions for the grain yield. However, important yield gaps were also observed when using it for farmers' fields conditions. We decided to reduce the fertility factor (SLPF) of CERES-Millet to take into account the low fertility levels of farmer's fields. This approach permitted us to obtain satisfactory simulations, better than what we obtained by reducing empirically the conversion coefficient of intercepted radiation to biomass for SARRA-H and CELSIUS. Yet, in order to obtain accurate yields forecasts, it appears necessary to improve the functioning of CERES-Millet and to study the options of how to adjust the coefficients SLPF.

Keywords: Crop model, Photoperiodism, Yield forecasting, Yield gaps, *Pennisetum glaucum* (L.) R. Br., Senegal.

Table des matières

Sigles et abréviations	3
Liste des tableaux.....	7
Liste des figures	8
Introduction générale	10
Chapitre 1 : Prévision agricole au Sahel	16
1.1 Historique.....	16
1.2 Systèmes de prévision et acteurs.....	17
1.2.1 Comité permanent Inter-États de Lutte contre la Sécheresse au Sahel (CILSS)	18
1.2.2 Système Mondial d'Information et d'Alerte Rapide sur l'alimentation et l'agriculture (SMIAR)	20
1.2.3 <i>Famine Early Warning Systems Network</i> (FEWS NET)	22
1.3 Méthodes de prévision des rendements au Sahel.....	24
1.3.1 Enquêtes agricoles	24
1.3.1.1 Méthode d'échantillonnage.....	24
1.3.1.2 Estimation des superficies cultivées	25
1.3.1.3 Estimation des rendements moyens départementaux	25
1.3.2 Méthodes qualitatives	26
1.3.3 Modèles de prévision	26
1.3.3.1 Modèles empiriques	26
1.3.3.2 Modèles mécanistes	26
1.3.3.2.1 Modèles agrométéorologiques	27
1.3.3.2.1.1 Système de suivi des zones à risques (ZAR).....	28
1.3.3.2.1.2 Système Intégré de Suivi et de Prévision des rendements (SISP).....	29
1.3.3.2.1.3 Modèle Diagnostic Hydrique des Cultures (DHC)	29
1.3.3.2.1.4 Télédétection	30
1.3.3.2.2 Modèles de simulation des cultures	32
1.4 Conclusion	33
Chapitre 2 : Étude et prise en compte en modélisation de l'effet de la latitude sur la réponse à la photopériode chez divers géotypes de mil (<i>Pennisetum glaucum</i> (L.) R. Br.) du Sénégal	35
2.1 Introduction.....	35
2.2 Matériel et méthodes.....	37
2.2.1 Présentation des sites d'étude	37
2.2.2 Matériel génétique	38
2.2.3 Dispositif expérimental et conduite de la culture	39
2.2.4 Observations et paramètres calculés	39
2.2.5 Analyses statistiques	40
2.2.6 Simulations de la réponse à la photopériode.....	40
2.2.6.1 Modèle utilisé.....	40
2.2.6.2 Paramétrage du modèle Impatience et simulations.....	41
2.3 Résultats	42
2.3.1 Effet de la date de semis sur les longueurs de cycle	42
2.3.2 Effet de la latitude sur le photopériodisme	42
2.3.3 Amélioration de la modélisation de la réponse à la photopériode	44
2.4 Discussion	47
2.5 Conclusion	48

Chapitre 3 : Pr�evision des rendements du mil (<i>Pennisetum glaucum</i> (L.) R. Br.) au S�enegal : quel apport de 2 mod�eles écophysiologiques (SARRA-H et CELCIUS) � base bilan hydrique ?.....	49
3.1 Introduction.....	49
3.2 Matériel et méthodes.....	51
3.2.1 Présentation des sites d'étude	51
3.2.2 Méthodologie de collecte des données des parcelles paysannes	54
3.2.3 Pratiques culturelles dans les zones d'étude	55
3.2.4 Présentation des modèles utilisés.....	57
3.2.4.1 Eléments communs aux 2 modèles.....	57
3.2.4.2 Spécificités du modèle SARRA-H.....	57
3.2.4.3 Spécificités du modèle CELSIUS.....	58
3.2.5 Calage et validation du modèle SARRA-H.....	59
3.2.6 Calage et validation du modèle CELSIUS.....	60
3.2.7 Simulation des cultures paysannes et analyse de données.....	61
3.3 Résultats.....	62
3.3.1 Validation du modèle SARRA-H sur le rendement en grain.....	62
3.3.2 Calage et validation du modèle CELSIUS.....	62
3.3.3 Application à la prévision des rendements des agriculteurs	63
3.3.4 Analyse de la variabilité des rendements mesurés dans les parcelles d'agriculteurs	64
3.3.5 Analyse des rendements simulés et des écarts de rendement	66
3.3.6 Analyse de sensibilité sur le coefficient de conversion de l'énergie en biomasse.....	71
3.4 Discussion.....	73
3.5 Conclusion	75
Chapitre 4 : �valuation du modèle CERES-Millet pour la simulation des interactions eau-fertilité en culture de mil (<i>Pennisetum glaucum</i> (L.) R. Br.) en vue de son utilisation éventuelle pour la prévision agricole au S�enegal	76
4.1 Introduction.....	76
4.2 Matériel et méthodes.....	77
4.2.1 Présentation du site d'étude	77
4.2.2 Données expérimentales	78
4.2.3 Description du modèle CERES-Millet.....	80
4.2.4 Calage du modèle CERES-Millet.....	81
4.2.5 Validation du modèle CERES-Millet	82
4.2.6 Application à la prévision des rendements des agriculteurs	82
4.3 Résultats.....	83
4.3.1 Calage du modèle CERES-Millet.....	83
4.3.1.1 Calage de la phénologie et de la croissance en biomasse du Souna en conditions non limitantes.....	83
4.3.1.2 Calage de la croissance en biomasse et du rendement du Souna sous différentes conditions d'alimentation hydrique	85
4.3.1.3 Calage de la croissance en biomasse et du rendement du Souna sous différentes conditions de fertilité	85
4.3.1.4 Calage de la phénologie et de la croissance en biomasse du Sanio	86
4.3.2 Validation du modèle CERES-Millet	87
4.3.3 Application à la prévision des rendements des agriculteurs	88
4.4 Discussion.....	90
4.5 Conclusion	92
Conclusion générale et perspectives	93
Références bibliographiques.....	96
Annexes.....	A

Sigles et abréviations

AMMA: Analyses Multidisciplinaires de la Mousson Africaine

AP3A : Alerte Précoce et Prévisions des Productions Agricoles

ARTEMIS : *Africa Real Time Environmental Monitoring Information System* (Système d'information et suivi en temps réel de l'environnement en Afrique)

AVHRR: *Advanced Very High Resolution Radiometer* (Radiomètre Avancé à Très Haute Résolution)

BAN : Bassin arachidier nord

BAS : Bassin arachidier sud

CB : Champ de brousse

CC : Champ de case

CCBS : Base de données sur les bilans céréaliers

CCD: *Cold Cloud Duration* (Nuages à sommets froids)

CELSIUS: *CEreal and Legume crops Simulator Under changing Sahelian environment*

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

CERES: *Crop Estimation through Resource and Environment Synthesis*

CESIA: *Centro Studi per l'applicazione dell'Informatica in Agricoltura* (Centre d'Études pour l'Application de l'Informatique à l'Agriculture)

CILSS : Comité permanent Inter-États de Lutte contre la Sécheresse au Sahel

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

CNRA : Centre National de Recherches Agronomiques

CRA : Centre Régional AgrHymet (Centre régional de formation et d'application en agrométéorologie et hydrologie opérationnelle)

CRA : Centre de Recherches Agricoles

CROPSYST : *CROPPing SYSTems simulation model* (Modèle de simulation des systèmes de culture)

CRZ : Centre de Recherches Zootechniques

DAPSA : Direction de l'Analyse, la Prospective et des Statistiques Agricoles

DHC : Diagnostic Hydrique des Cultures

DIAPER : Projet d'amélioration des instruments du diagnostic permanent des secteurs de l'agriculture et de l'élevage

DMN : Direction de la Météorologie Nationale

DR: District de Recensement

DSSAT: *Decision Support System for Agrotechnology Transfer*

ECLO : *Emergency Centre for Locust Operations* (Centre d'intervention antiacridienne d'urgence)

EMPRES : *Emergency Prevention System for Animal Health* (Système de prévention et de réponse rapide contre les ravageurs et les maladies transfrontalières des animaux et des plantes)

ESA : *European Space Administration* (Agence Spatiale Européenne)

ESPACE : Evaluation et Suivi de la Production Agricole en fonction du Climat et de l'Environnement

ET0 : Evapotranspiration de référence

FAO : *Food and Agriculture Organization* (Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture)

FED : Fonds Européen de Développement

FESW : *Fraction Evaporable Soil Water* (Fraction d'eau évaporable dans le sol)

FEWS NET: *Famine Early Warning Systems Network*

FTSW: *Fraction of Transpirable Soil Water within the bulk root zone* (Fraction d'eau transpirable du sol)

GMFS : *Global Monitoring for Food Security* (Suivi global de la sécurité alimentaire en Afrique)

GSFC: *US NASA Goddard Space Flight Center* (Centre de vols spatiaux Goddard)

H-C : Haute-Casamance

IA : Indice d'agrément

IATA: *Agrometeorology and Environmental Analysis for Agriculture* (Institut d'Agrométéorologie et Analyse Environnementale)

IGAD : *Intergovernmental Authority on Development* (Autorité intergouvernementale pour le développement)

INSAH : Institut du Sahel

IRD : Institut de Recherche pour le Développement

ISRA : Institut Sénégalais de Recherches Agricoles

ISRIC: *International Soil Reference and Information Centre*

ITC: *International Institute for Aerospace Surveys and Earth Sciences*

Kc: Coefficient cultural

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

NASA : *National Aeronautics and Space Administration* (Administration Spatiale et Aéronautique Nationale)

NDVI : *Normalized Difference Vegetation Index* (Indice de végétation de la différence normalisée)

NOAA: *National Oceanic and Atmospheric Administration* (Administration Océanographique et Atmosphérique Nationale)

OMM: Organisation Météorologique Mondiale

ONG : Organisation Non Gouvernementale

ORSTOM : Office de la Recherche Scientifique et Technique d’Outre-Mer

P4AS : Projet Pilote de Prévision des Productions Agricoles au Sahel

PAM : Programme Alimentaire Mondial

PAR : *Photosynthetically Active Radiation* (Rayonnement Photosynthétiquement Actif)

PPAAO: Programme de Productivité Agricole en Afrique de l’Ouest

RAINT : Rayonnement intercepté photosynthétiquement actif

RPGH : Recensement Général de la Population et de l’Habitat

RRMSE : *Relative Root Mean-Squared Error* (Racine de l’erreur quadratique moyenne relative)

SADC : *Southern African Development Community* (Communauté de développement d’Afrique australe)

SAP : Système d’Alerte Précoce

SARIA : Systèmes d’Alerte Rapide et d’Information sur l’Alimentation

SARRA : Système d’Analyse Régional des Risques Agroclimatiques

SARRA-H : Système d’Analyse Régional des Risques Agroclimatiques – « Habillé »

SDD : *Stress Degree Day*

SDDR : Services Départementaux du Développement Rural

SDRN : *Environment and Natural Resources Service* (Unité de gestion de l'information sur l'environnement de la FAO)

SIAP: Système Intégré pour l'Alerte Précoce

SISP : Système Intégré de Suivi et de Prévision des rendements

SLA: *Specific Leaf Area* (Surface foliaire spécifique)

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

SMIAR : Système Mondial d'Information et d'Alerte Rapide sur l'alimentation et l'agriculture

STICS : Simulateur multIdisciplinaire pour les Cultures Standard

SVS : Suivi de la Vulnérabilité au Sahel

TBASE: Température de base

TOPT: Température optimale

UE : Union Européenne

USAID: *United States Agency for International Development* (Agence des États-Unis pour le développement international)

USDA : *United States Department of Agriculture* (Département de l'Agriculture des États-Unis)

USGS : *U.S. Geological Survey* (Observatoire Géologique des États-Unis)

VITO : Institut Flamand de Recherche Technologique

WISE: *World Inventory of Soil Emission Potential*

Yobs : Rendement observé

Yp : Rendement potentiel

Ypg : Écart de rendement entre rendement potentiel et rendement limité par l'eau

Yw : Rendement limité par l'eau

Ywg : Écart de rendement entre rendement limité par l'eau et rendement observé

ZAR : Zones à Risque

Liste des tableaux

Tableau I : Caractéristiques des 8 géotypes de l'étude	39
Tableau II : Valeurs des coefficients génétiques obtenues lors du paramétrage du modèle Impatience.....	44
Tableau III : Caractéristiques des villages d'étude	52
Tableau IV : Pluviométries annuelles en millimètres des villages d'étude enregistrées lors des différentes années de suivi. Les lettres A, B et C entre les parenthèses traduisent le nombre de pluviomètres installés dans le village	53
Tableau V : Caractéristiques des essais	79
Tableau VI : Caractéristiques des sols de l'étude	83

Liste des figures

Figure 1 : Exemple de carte produite par le CILSS présentant les niveaux des rendements attendus du mil en cas de confirmation des prévisions saisonnières pluviométriques en 2013. La carte est tirée du bulletin mensuel n°04 (juillet 2013)	19
Figure 2 : Exemple de carte (tirée du rapport n° 4 du 7 septembre 2001) produite par le SMIAR présentant les prévisions de rendement du mil au 31 juillet au Sahel pour la saison agricole 2001. Les pourcentages sont calculés par rapport au rendement moyen des 5 dernières années (1996-2000)	21
Figure 3 : Exemple de carte produite par le FEWS NET présentant les conditions estimées de la sécurité alimentaire pour la période juillet-septembre 2013	23
Figure 4 : Exemple de résultats d'une équation empirique montrant la relation entre le rendement du coton au Mali et la pluie annuelle	27
Figure 5 : Localisation des sites expérimentaux (CRA de St-Louis, CNRA de Bambey et CRZ de Kolda)	37
Figure 6 : Évolution de la photopériode sur les sites de Ndiol, Bambey et Kolda durant l'année civile.....	38
Figure 7 : Effet de la date de semis et de la latitude sur la durée semis-feuille drapeau (°C.j) des 8 génotypes sur les 3 sites. Les barres d'erreurs représentent les valeurs d'intervalles de confiance calculées au seuil de 5%	43
Figure 8 : Evolution du coefficient de photopériodisme des 8 génotypes en fonction de la latitude	44
Figure 9 : Durées semis-initiation paniculaire (SIP) des sites de Ndiol (A), Bambey (B) et Kolda (C) simulées avec les paramétrages respectifs obtenus sur ces sites en fonction des durées semis-initiation paniculaire (SIP) observées correspondantes	45
Figure 10 : Durées semis-initiation paniculaire (SIP) simulées avec le paramétrage ajusté à Ndiol (A) et à Kolda (B) en fonction des durées semis-initiation paniculaire (SIP) observées correspondantes.....	46
Figure 11 : Localisation géographique des villages d'étude.....	52
Figure 12 : Variation des valeurs moyennes journalières du rayonnement global (A) et des températures minimale et maximale (B) sur les périodes 1990-1991 et 2006-2012	53
Figure 13 : Typologie des champs en lien avec la gestion de la fertilité dans les 3 zones d'étude. Les taux sont calculés par rapport à la zone	56
Figure 14 : Résultats de la validation du modèle SARRA-H sur le Souna (A) et sur le Sanio (B) pour le rendement en grain	62
Figure 15 : Résultats de la validation de la phénologie de CELSIUS (A) et courbes enveloppes permettant de déterminer les paramètres Cgrain et CgrainV0 du Souna (B) et du Sanio (C). Les chiffres entre parenthèses sur la figure A représentent les dates de semis en jours juliens. (NbGrainsObs = nombre de grains observé et PtsCouEnvel = Points de la courbe enveloppe).	63
Figure 16 : Comparaison, à l'aide des modèles SARRA-H (A) et CELSIUS (B), des rendements moyens obtenus avec les résultats des simulations en considérant des « conditions moyennes » (YPrév), et de ceux obtenus en considérant les parcelles individuellement (YwMoy) avec les rendements des agriculteurs des villages-années.....	64
Figure 17 : Variabilité des rendements dans les parcelles des agriculteurs en fonction des villages-années. Les nombres entre les crochets représentent les pluviométries annuelles	65

Figure 18 : Rendements moyens des agriculteurs en fonction de la typologie établie. Les barres d'erreurs représentent les valeurs d'intervalles de confiance calculées au seuil de 5%	66
Figure 19 : Écarts de rendement entre rendements potentiels (Y_p) et rendements limités par l'eau (Y_w) pour les simulations avec SARRA-H et CELSIUS. Les barres d'erreurs représentent les valeurs d'intervalles de confiance calculées au seuil de 5%.....	67
Figure 20 : Variabilité des rendements limités par l'eau simulés avec SARRA-H et CELSIUS en fonction des villages-années dans le BAN (A) et le BAS + H-C (B). Les nombres entre les crochets représentent les pluviométries annuelles	68
Figure 21 : Variabilité des écarts de rendement (Y_{wg}) obtenus avec les simulations avec SARRA-H et CELSIUS en fonction des villages-années dans le BAN (A) et le BAS + H-C (B). Les nombres entre les crochets représentent les pluviométries annuelles.....	68
Figure 22 : Moyenne des écarts de rendement obtenus avec les simulations de SARRA-H (A) et CELSIUS (B) en fonction de la typologie établie. Les barres d'erreurs représentent les valeurs d'intervalles de confiance calculées au seuil de 5%	69
Figure 23 : Comparaison entre parcelles d'agriculteurs et sous-parcelles fertilisées des écarts de rendement obtenus avec les simulations de SARRA-H (A) et CELSIUS (B). Les nombres entre les crochets représentent les pluviométries annuelles	70
Figure 24 : Comparaison de la variabilité des écarts de rendement entre périodes dans le BAN (A) et le BAS+H-C (B).....	71
Figure 25 : Rendements des villages-années simulés avec $E_b = 2,8 \text{ g.MJ}^{-1}$ pour SARRA-H (A) et $E_{b\max} = 1,5 \text{ g.MJ}^{-1}$ pour CELSIUS (C) en fonction des rendements des agriculteurs, et écarts de rendement obtenus avec SARRA-H (B) et CELSIUS (D) en fonction des pluies	72
Figure 26 : Moyennes mensuelles des pluviométries du CNRA de Bambey des années 1996, 1997, 1998 et 2012. Les barres d'erreur représentent les écarts-types	78
Figure 27 : Résultats du calage du Souna en conditions non limitantes pour le LAI (A), la biomasse aérienne (B) et le rendement en grain (C). Les points représentent les valeurs observées et les lignes continues les valeurs simulées	84
Figure 28 : Résultats du calage du Souna sous différentes conditions d'alimentation hydrique pour le LAI (A), la biomasse aérienne (B) et le rendement en grain (C). Les points représentent les valeurs observées et les lignes continues les valeurs simulées	85
Figure 29 : Résultats du calage du Souna sous différentes conditions d'alimentation azotée pour le LAI (A), la biomasse aérienne (B) et le rendement en grain (C). Les points représentent les valeurs observées et les lignes continues les valeurs simulées.....	86
Figure 30 : Résultats du calage du Sanio sous différentes conditions d'alimentation hydriques et azotées pour le LAI (A), la biomasse aérienne (B) et le rendement en grain (C). Les points représentent les valeurs observées et les lignes continues les valeurs simulées.....	87
Figure 31 : Résultats de la validation du Souna sur le rendement en grain	88
Figure 32 : Rendements simulés en fonction des rendements des agriculteurs des villages-années pour des valeurs de SLPF de 1 (A) et de 0,62 (B)	89
Figure 33 : Écarts de rendement en fonction des rendements des agriculteurs des villages-années dans le BAN et le BAS + H-C	90

Introduction générale

Situé à l'extrême Ouest de l'Afrique, le territoire sénégalais est compris entre 12,13° et 16,68° de latitude nord et -11,35° et -17,53° de longitude ouest. Le Sénégal est un pays plat, constitué essentiellement de plaines et de plateaux.

Les températures, généralement élevées, varient dans le temps (avec les saisons) et dans l'espace (proximité ou éloignement de l'océan). Les minima thermiques sont atteints pendant le mois de janvier et les maxima juste avant (mai-juin) et juste après (octobre-novembre) la saison des pluies. Le Sénégal est caractérisé par l'alternance d'une saison sèche d'octobre à mai marquée par la prédominance des alizés maritimes sur la côte, et d'une saison humide (appelée aussi « hivernage ») de juin à septembre dominée par un flux de mousson issu de l'Anticyclone de Sainte-Hélène. Le maximum de pluviométrie se situe en août et septembre. A l'instar des autres pays sahéliens, le Sénégal est confronté à une forte variabilité inter-annuelle des précipitations. La période 1970-1993 a été marquée par une baisse importante des pluies (Ndong, 1995). A cette période de sécheresse, ont succédé, depuis le milieu des années 1990, des conditions pluviométriques meilleures. Celles-ci sont associées le plus souvent à des pluies parfois intenses et de plus en plus fréquentes même si elles demeurent très variables (Salack *et al.*, 2011). A la variabilité inter-annuelle s'ajoute une variabilité spatiale très marquée. La pluviométrie moyenne annuelle suit un gradient croissant du nord au sud du pays, passant de 200 mm au nord à 1400 mm au sud (Salack *et al.*, 2011).

La variabilité des conditions bioclimatiques et la diversité du *substratum* géologique font que le Sénégal recèle plusieurs types de sol (Charreau et Fauck, 1965) qui ont des aptitudes agricoles inégales et dont les plus dominants selon la classification de (Aubert, 1963) sont:

- les sols minéraux bruts de cuirasse sur schiste (2,4%);
- les sols minéraux bruts de cuirasse sur grès argileux (8,1%);
- les sols gravillonnaires sur cuirasse (11,6%);
- les sols brun-rouge subarides sur sable (14,2%)
- les sols ferrugineux tropicaux faiblement lessivés sur sable, dits sols « Dior » (20%);
- les sols ferrugineux tropicaux lessivés sur grès sablo-argileux (17,2%);
- les sols ferrugineux tropicaux lessivés cuirassés sur schiste (12,4%);
- les sols faiblement ferrallitiques sur grès sablo-argileux (6,2%);
- les sols halomorphes sur alluvions argileuses (1,9%);
- les sols hydromorphes sur argile de décantation (0,2%);
- les sols hydromorphes sur argile (3,3%);
- les sols sulfatés acides sur sable (2,5%).

Selon le plan national d'aménagement du territoire (Direction de l'aménagement du territoire, 1999), près de la moitié des sols du pays (47%) sont médiocres ou inaptes à l'agriculture au sens large. Près de 36% sont pauvres à moyens et présentent des facteurs limitants (faible teneur en matière organique, en phosphore, en azote et faible capacité de rétention hydrique) qui n'autorisent que des rendements faibles. Les sols du Sénégal se caractérisent dans leur grande majorité par une grande sensibilité à l'érosion. Cette sensibilité est liée essentiellement à leur texture sableuse, leur structure instable et leur faible teneur en matière organique (Khouma, 2002).

La diversité des sols et leur vocation agricole, combinées à la diversité climatique et à la disponibilité de ressources hydriques ont conduit à la détermination de 6 entités géographiques homogènes appelées zones écogéographiques (annexe 1) (CSE, 2007) :

- la vallée du fleuve Sénégal qui couvre l'extrême Nord et l'Est du territoire. Les cultures irriguées et de décrue (maraîchage et riziculture) y sont pratiquées, dont des cultures industrielles comme la canne à sucre (*Saccharum officinarum* L.) et la tomate (*Solanum lycopersicum* L.). Cette zone fournit 8% des terres arables du pays;
- la zone sylvo-pastorale qui se situe immédiatement au sud de la vallée du fleuve et qui occupe une partie de la zone sahéenne et une partie de la zone sahélo-soudanienne. Du fait du caractère austère de l'environnement, l'élevage extensif constitue le principal système de production. Cependant près de 4% des terres arables du pays se trouvent dans cette zone;
- la zone du littoral et des Niayes qui fournit près de 80% de la production horticole du Sénégal. L'élevage intensif y est pratiqué, notamment l'élevage bovin et l'aviculture. Les terres arables de cette zone ne représentent que 1% des terres arables du pays;
- le bassin arachidier correspond à la zone agricole où domine la culture arachidière. Par ailleurs, l'essentiel de la production agricole nationale provient de cette zone de cultures sous pluies qui fournit 57% des terres arables du pays. Elle est la source de près de 2/3 de la production nationale de mil (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.) et d'arachide (*Arachis hypogaea* L.), les 2 principales cultures du pays ;
- la Casamance qui est la partie la plus arrosée du Sénégal. Près de 20% des terres arables du pays s'y trouvent. La densité du réseau hydrographique rend cette zone très propice à la riziculture, surtout au niveau des bas-fonds;
- le Sénégal oriental (Centre-Est et Sud-Est) qui abrite d'importantes réserves fauniques.

C'est une région où se développent de plus en plus l'agriculture et l'élevage extensif avec le fort courant migratoire provoqué par l'épuisement des terres de la partie Ouest du pays et la précarité des pâturages du Nord du Sénégal. Les terres de cette partie du Sénégal représentent près de 10% des terres arables du pays.

L'agriculture représente un des secteurs essentiels de l'économie du Sénégal. Elle contribue pour une valeur relativement importante (17%) au produit intérieur brut (Ministère de l'Économie et des Finances du Sénégal, 2011) et pourvoit en matières premières les industries de transformation (huileries, sucrerie, filature et textile, menuiserie). L'agriculture sénégalaise est cependant peu diversifiée. Elle repose à la fois sur des cultures de rente, à savoir l'arachide, le coton (*Gossypium* sp.) et sur des cultures vivrières de subsistance telles que le mil, le sorgho (*Sorghum bicolor* L. Moench), le maïs (*Zea mays* L.) et le riz (*Oryza Sativa* L.). Dans la grande majorité, les producteurs agricoles sont de petits exploitants qui pratiquent des assolements traditionnels. La plupart d'entre eux combinent cultures de rente et cultures vivrières de subsistance, tout en possédant quelques animaux, en élevage extensif. Par ailleurs les régimes fonciers sont encore majoritairement traditionnels. Les agriculteurs sénégalais doivent faire face aux incertitudes des marchés dans un contexte de croissance démographique encore élevée.

Parmi les cultures céréalières, le mil occupe la place la plus importante aussi bien du point de vue des surfaces emblavées (presque 75%) que de la production (60%). Le mil est cultivé soit avec une légumineuse en association, généralement le niébé (*Vigna unguiculata* [L.] Walp.), soit en culture pure. Il est semé au plus tôt, soit à sec avant les pluies (en mai ou juin), soit avec la première pluie jugée utile, toujours en plaçant beaucoup de grains (30 à 40) dans le poquet. Un démariage ultérieur, généralement lors du premier ou du second sarclage, permet de réduire à 4-5 (en moyenne) le nombre de plants par poquet. Parfois, un deuxième, voire un troisième semis est nécessaire surtout si une période de sécheresse survient juste après le premier semis (Spencer et Sivakumar, 1987). Les densités de poquets en champs sont généralement faibles (entre 6000 et 30 000 poquets.ha⁻¹) mais restent très variables en fonction de la zone agro-écologique.

Les variétés à cycle court (Souna) sont prédominantes depuis les années 80 du fait de la saison des pluies courte. Les agriculteurs ont un très faible recours aux engrais minéraux. Le système de gestion des exploitations est caractérisé par l'utilisation de la main-d'œuvre familiale, des outils manuels, un faible accès au marché et une faible utilisation des produits phytosanitaires.

Cependant, les rendements du mil sont plus faibles que ceux des autres céréales, en raison de nombreuses contraintes d'ordre variétal, agronomique, agro-pédologique (Fofana, 1996), et de

ravageurs de tout ordre et d'adventices. Les ravageurs sont principalement les oiseaux granivores, les insectes, les champignons pathogènes (Ndoye *et al.*, 1984).

Le mil est une culture alimentaire très importante dans les régions semi-arides du Sénégal. Il existe une multitude de plats à base de mil (couscous, bouillie, beignets). Les grains et les tiges de cette céréale sont aussi utilisés pour l'alimentation animale. Après la récolte, les tiges sont utilisées pour confectionner des cases, des greniers et des clôtures (Spencer et Sivakumar, 1987).

L'agriculture sénégalaise est essentiellement pluviale et saisonnière, de sorte que l'activité agricole est exposée aux aléas climatiques. La variabilité pluviométrique inter-annuelle et intra-saisonnière des zones soudano-sahéliennes est une des plus importantes au monde. Elle implique des incertitudes et risques pour les cultures qui constituent, au-delà des conditions socio-économiques générales, le principal obstacle à l'intensification agricole (Hansen, 2005). Ses impacts ont de plus été accentués depuis la fin des années 60 par une diminution globale des pluies et une augmentation de son irrégularité. Ainsi, l'Afrique de l'ouest subit des déficits de production fréquents, engendrant parfois des crises alimentaires. Au Sénégal, la dépendance alimentaire céréalière est très importante. Dans ce contexte climatique incertain, les États ont recours à la prévision agricole qui leur permet d'avoir une estimation précoce des productions (Samba *et al.*, 2001). Ainsi, ils peuvent gérer au mieux la sécurité alimentaire en anticipant et évitant les crises éventuelles.

Deux options existent pour produire des statistiques agricoles : d'une part les enquêtes, qui permettent de déterminer les rendements en différents lieux, et ensuite de traiter statistiquement les informations, et d'autre part le recours à des modèles pour estimer, sur la base des conditions climatiques (pluviométriques essentiellement) de la campagne, les rendements. Les enquêtes sont jusqu'à présent largement utilisées mais ont comme désavantage d'être très lourdes, fastidieuses et onéreuses pour les États. Les résultats définitifs arrivent en général bien après la fin de la campagne. Le recours à des modèles peut permettre de produire les informations demandées et ce, dès le début des récoltes, voire avant, au cours de la campagne agricole (Samba *et al.*, 2001).

A l'heure actuelle, le Centre Régional AgrHymet (CRA), relayé par les Directions de la Météorologie Nationale (DMN), réalise les prévisions pour les zones soudano-sahéliennes. Il utilise un outil simple : le modèle Diagnostic Hydrique des Cultures (DHC) (Samba, 1998; Samba *et al.*, 2001). Développé en 1990, le modèle DHC couple un bilan hydrique à une relation empirique estimant le rendement moyen en mil d'un village. Mais DHC n'a été validé que pour le mil Souna (cycle court) alors que le besoin d'utilisation sur une diversité de cultures (autres variétés de mil, sorgho, maïs) traditionnelles et photopériodiques est nécessaire (Diop *et al.*, 2005). Des travaux

plus récents ont permis de développer un modèle de simulation de la croissance des cultures bien adapté aux céréales: le Système d'Analyse Régional des Risques Agroclimatiques - « Habillé » (SARRA-H) (Dingkuhn *et al.*, 2003). SARRA-H permet de simuler le comportement et de prévoir le rendement de divers génotypes dans de bonnes conditions culturales. Cependant SARRA-H a été développé pour l'échelle de la parcelle agricole alors que la prévision des rendements nécessite la détermination d'un rendement moyen à l'échelle d'un village, voire de la région. Par ailleurs, il n'a pas été conçu pour prendre en compte différentes conditions de fertilité ou de gestion agronomique.

Au travers de notre travail de thèse, nous souhaitons apporter quelques éléments pour contribuer à améliorer les possibilités de prévoir les rendements du mil en milieu sahélien par le biais d'outils de modélisation. Nous aborderons ainsi les points suivants :

- la caractérisation des cycles et sensibilités à la photopériode en interaction avec la latitude des principaux génotypes locaux et améliorés de mil du Sénégal ;
- la documentation et l'analyse des productivités et conditions de production en milieu paysan ;
- l'évaluation de la capacité de 2 modèles écophysiologiques à base bilan hydrique (SARRA-H et CELCIUS) à prédire les rendements paysans ;
- l'évaluation de la capacité d'un outil de modélisation plus complexe (CERES-Millet), capable en particulier d'intégrer de façon dynamique l'interaction eau-fertilité, à estimer les rendements paysans.

La démarche de recherche combine des expérimentations en station en vue de caler et valider des modèles de culture, des simulations à l'aide de ces modèles et des suivis de parcelles d'agriculteurs en vue de documenter les réalités paysannes et de comparer les résultats simulés aux rendements des agriculteurs. La thèse s'appuie sur une base de données que nous avons conçue sous Microsoft Access, à partir de données collectées aussi bien dans le cadre de nos travaux de terrains que de travaux antérieurs.

Les expérimentations dont les données ont été utilisées ont été conduites en contre-saison et en hivernage à 3 périodes différentes. Les expérimentations de la première période (1996-1999) portaient sur l'effet combiné du régime hydrique et de la fertilisation azotée sur le développement et la productivité du mil (Diouf, 2000). Les données de la deuxième période (2006-2008) ont été collectées dans le cadre des travaux de Siéné *et al.* (2010a, 2010b) dont l'objectif était de caractériser le développement, la productivité et le bilan radiatif du mil Souna 3 et du Sanio sous différentes densités. Les données de la dernière période correspondent à des expérimentations que

nous avons conduites dans le cadre de la thèse (2011-2012). Dans un premier temps, il s'est agi de caractériser sous 3 latitudes différentes le développement phénologique de divers géotypes de mil, d'origine paysanne ou moderne et d'améliorer la modélisation du photopériodisme en conséquence. Dans un second temps, les essais ont porté sur la réponse du mil Souna 3 et du Sanio de Séfa à divers niveaux d'alimentations hydrique et minérale.

Les données de suivis de parcelles paysannes ont été collectées également à 3 périodes différentes, dans le cadre de 3 projets de recherche : le projet Evaluation et Suivi de la Production Agricole en fonction du Climat et de l'Environnement (ESPACE, 1990-1991), le projet Analyses Multidisciplinaires de la Mousson Africaine (AMMA, 2006-2008) et le Programme de Productivité Agricole en Afrique de l'Ouest (PPAAO, 2009-2012). Ce dernier a servi de cadre pour le développement de nos travaux de thèse. Les informations collectées au cours des suivis ont porté sur l'historique et les caractéristiques des parcelles, les interventions des agriculteurs et les rendements.

Les simulations ont été effectuées avec 2 modèles écophysiologiques à base bilan hydrique, SARRA-H et CELSIUS (conçu selon le principe de la modélisation *ad hoc*) et CERES-Millet qui simule en plus la dynamique de l'azote. L'approche a consisté à vérifier dans un premier temps l'apport de modèles écophysiologiques et dans un second temps celui d'un modèle qui gère en plus la dynamique de l'azote en prévision des rendements paysans.

Le document est composé de 4 chapitres. Le premier chapitre fait un point sur la prévision agricole au Sahel en mettant l'accent sur l'historique, les systèmes en place et les méthodes. Le deuxième chapitre porte sur la caractérisation du développement phénologique d'un ensemble de géotypes de mil et propose une méthode pour l'amélioration de la modélisation de leur réponse à la photopériode. Le troisième chapitre explore les possibilités d'améliorer la prévision des rendements paysans à l'aide de 2 modèles écophysiologiques à base bilan hydrique (SARRA-H et CELSIUS). Le dernier chapitre évalue l'apport d'un modèle complexe de référence (CERES-Millet) pour la prévision des rendements paysans.

Chapitre 1 : Préviation agricole au Sahel

1.1 Historique

L'une des conséquences de la crise énergétique survenue au début des années 1970 a été une série de régressions de la production alimentaire mondiale. Il en a résulté une situation alimentaire préoccupante, aggravée en 1972 et en 1974 par des conditions météorologiques défavorables. Cette situation va emmener l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) à organiser la Conférence internationale de l'alimentation en 1974 à Rome. L'une des recommandations de cette réunion était la mise en place du Système Mondial d'Information et d'Alerte Rapide sur l'alimentation et l'agriculture (SMIAR), finalement créé en 1975. Son mandat était de fournir au niveau international des données et analyses exhaustives sur la situation et les perspectives de l'offre et de la demande alimentaires (FAO, 1975). Prévu pour couvrir l'ensemble du monde, le système va mettre l'accent sur les pays et régions où les risques d'urgence alimentaire sont les plus grands. Le SMIAR se concentre alors sur l'Afrique subsaharienne, principalement le Sahel où la famine fait quelque 100 000 morts (Center for Disease Control, 1973). Une vaste opération internationale de secours d'urgence est alors lancée pour éviter que la famine ne fasse davantage de victimes.

Au niveau local, la mobilisation se traduit par la création en 1973 du Comité permanent Inter-États de Lutte contre la Sécheresse au Sahel (CILSS). Son but était de fournir aux décideurs et aux organismes d'aide des informations, aussi précises et récentes que possible, sur tous les aspects de l'offre et de la demande d'aliments. Le CILSS compte 2 institutions spécialisées qui contribuent à renforcer son action dans le domaine de la sécurité alimentaire : le CRA créé en 1974 et l'Institut du Sahel (INSAH) créé en 1976. Lors de la deuxième grande sécheresse en 1984 qui a nécessité une intervention massive en aide alimentaire, il est apparu que la région sahélienne n'était pas encore capable d'évaluer l'ampleur du fléau et de définir des actions appropriées. C'est conscient de cette lacune que le CILSS et les pays ont vu la nécessité de renforcer les dispositifs d'information pour mieux prévenir et gérer les crises alimentaires. C'est dans ce cadre que le « Projet d'amélioration des instruments du diagnostic permanent des secteurs de l'agriculture et de l'élevage » (DIAPER, 1984-1998) vit le jour, avec la collaboration de la FAO (SMIAR). Financé par le Fonds Européen de Développement (FED), il connut 3 phases (DIAPER 1 de 1984 à 1988, DIAPER 2 de 1988 à 1992 et DIAPER 3 de 1994 à 1998). Ses activités étaient organisées autour de 3 principaux domaines : l'appui institutionnel, le développement méthodologique et la formation. Le DIAPER était un projet d'appui technique et matériel aux services nationaux des pays membres du CILSS, contribuant à la collecte de données statistiques sur l'agriculture et l'élevage. Il était le précurseur du

dispositif d'enquête agricole intégrant la prévision des récoltes, l'estimation des stocks et les systèmes d'information sur les marchés de céréale et de bétail. Il a favorisé la mise en place des Systèmes d'Alerte Précoce (SAP) dans chacun des pays membre du CILSS. La première enquête selon la méthode DIAPER a eu lieu en 1985.

Les systèmes nationaux reposent aujourd'hui sur des méthodologies d'enquête diverses. Mais d'une manière générale, ils visent prioritairement l'identification des besoins alimentaires des populations vulnérables et un meilleur ciblage des aides alimentaires. Au Sénégal, les données de l'enquête sur les superficies remontent à 1960. Cependant, il faut signaler que la méthodologie a beaucoup évolué au fil des ans. Avant 1985, ce sont les services régionaux de l'agriculture qui envoyaient leurs données à la direction centrale qui se chargeait de les compiler. A partir de 1985, le CILSS a élaboré une méthodologie harmonisée pour l'ensemble des pays membres. Depuis 1997, avec l'organisation du premier recensement de l'agriculture, la base de sondage est régulièrement actualisée. L'enquête dans sa forme actuelle est annuelle depuis 1992.

Parallèlement aux enquêtes, et s'appuyant sur les connaissances des relations entre le climat et le fonctionnement du peuplement végétal (Monteith, 1984), ont été développés des modèles de simulation du comportement hydrique des plantes (Lalau-Keraly, 1991). Le plus ancien est celui de Frère et Popov (1987), conçu par la FAO et permettant de calculer un indice de satisfaction du besoin en eau des plantes durant l'évolution de la campagne agricole. Le second modèle (DHC) a été développé en 1988 pour fonctionner en routine au centre de Niamey par le CRA et le Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD) dans le cadre du projet ESPACE. Il permet d'estimer et d'actualiser les termes du bilan hydrique pour estimer un rendement espéré. Par ailleurs, un dispositif agroclimatologique d'observation des cultures a été mis en place, en collaboration avec les composantes nationales concernées par le projet ESPACE pour calibrer le modèle (Forest et Cortier, 1991). Aujourd'hui, le modèle DHC demeure encore le principal outil de prévision des rendements du mil utilisé par le CRA en Afrique de l'ouest, au Tchad et au Cameroun.

1.2 Systèmes de prévision et acteurs

Les prévisions de récoltes céréalières sont très importantes dans la prise de décision dans le domaine de la sécurité alimentaire. Elles permettent principalement d'établir le bilan céréalier prévisionnel annuel. Ce bilan, qui fait le rapprochement entre les disponibilités et les besoins prévisionnels, est devenu au fil du temps un instrument indispensable de politique à court terme.

Les gouvernements s'y réfèrent pour élaborer le programme annuel d'importation de céréales, ainsi que les programmes d'aide alimentaire (FAO, 2000).

Aujourd'hui, divers acteurs mènent des actions plus ou moins complémentaires pour la prévision des récoltes au Sahel. Il s'agit principalement du CILSS, en collaboration avec les gouvernements des pays membres, de la FAO à travers le SMIAR et l'*United States Agency for International Development* (USAID) à travers le *Famine Early Warning Systems Network* (FEWS NET).

1.2.1 Comité permanent Inter-États de Lutte contre la Sécheresse au Sahel (CILSS)

Composé à sa naissance de 9 pays de la zone sahélienne, le CILSS compte aujourd'hui 13 pays membres avec l'adhésion récente de la Côte d'Ivoire, du Bénin, du Togo et de la Guinée. Le secrétariat exécutif est basé à Ouagadougou (Burkina Faso), le CRA est hébergé à Niamey (Niger) et l'INSAH, centre de recherche agro-socio-économique et sur la population et le développement, est basé à Bamako (Mali).

Dans les pays du CILSS, la prévision des récoltes est placée sous la responsabilité technique du ou des services qui ont à charge l'enquête agricole annuelle. L'appréciation et la validation des résultats est souvent le fait d'un comité national qui regroupe différents services concernés dont ceux opérant dans le cadre du SAP s'il en existe. Dans certains pays, les chiffres de prévision sont présentés en conseil des ministres (FAO, 2000).

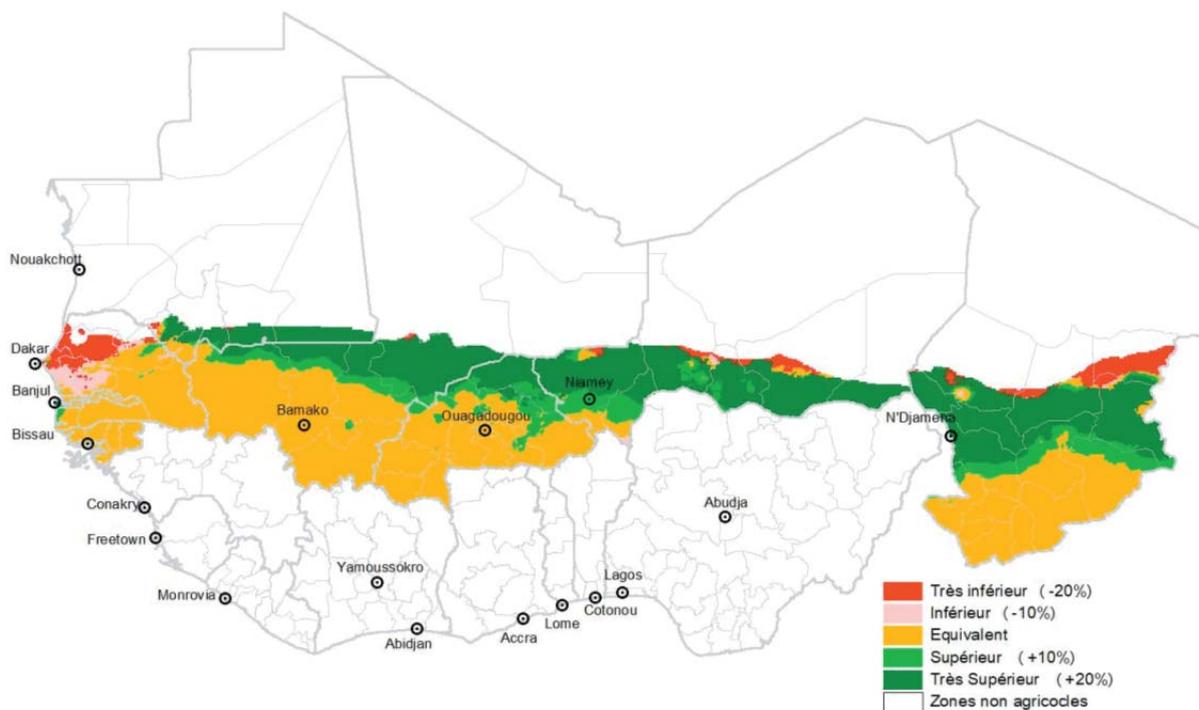
Par ailleurs, le CILSS et la FAO organisent annuellement en parfaite collaboration avec les techniciens nationaux une mission conjointe d'évaluation de la campagne agricole. Cette mission a pour but de vérifier la pertinence des prévisions faites, au regard d'une part de l'application effective des méthodologies en vigueur et d'autre part, du déroulement de la campagne agricole. Une réunion régionale, sous les auspices du CILSS permet de faire l'analyse par pays et la synthèse régionale. Pour toutes ces raisons, une période de disponibilité des premiers chiffres de prévision est strictement fixée pour tous les pays du CILSS (FAO, 2000).

Parfois, le CILSS bénéficie d'appuis financiers de certains partenaires pour renforcer ses actions. Celles-ci s'inscrivent dans ce cas dans le cadre de divers projets. C'est le cas du projet « Suivi de la Vulnérabilité au Sahel (SVS) » qui a démarré en 2003 et qui était financé par la Coopération italienne. Ce projet a fait suite et a consolidé les acquis de l'ex-projet « Alerte Précoce et Prévisions des Productions Agricoles » (AP3A, 1995-2001) afin de mieux répondre aux besoins des différentes institutions opérant dans la prévention de crises dans le domaine de la sécurité alimentaire et de la gestion des ressources naturelles. L'AP3A était le fruit d'une collaboration entre le CILSS, la

Coopération italienne et l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM). Il a permis de développer des méthodologies qui ont été intégrées au Système Intégré pour l'Alerte Précoce (SIAP).

Un autre projet, le « Suivi global de la sécurité alimentaire en Afrique » (GMFS, 2010-2013) a été financé par l'Agence Spatiale Européenne (ESA). Dans le cadre de ce projet, la méthodologie de prévision des rendements utilisée est une approche statistique opérationnelle qui combine un grand nombre de variables explicatives potentielles multi-sources (climatologiques, agrométéorologiques et télédétection) pour trouver les meilleures variables explicatives du rendement. Les prévisions réalisées dans le cadre de ce projet sont utilisées par les pays africains du Sahel pour la prévision en cours de campagne des rendements agricoles du mil, du maïs et du sorgho.

De façon générale, les résultats de prévision du CILSS sont présentés sous-forme de cartes (figure 1) qui sont régulièrement publiées dans des bulletins.



1.2.2 Système Mondial d'Information et d'Alerte Rapide sur l'alimentation et l'agriculture (SMIAR)

Le SMIAR est un réseau mondial qui fait intervenir 115 gouvernements, 61 Organisations Non-gouvernementales (ONG) et de nombreux établissements de commerce, de recherche et d'information. Il est administré par le service mondial d'information et d'alerte rapide de la division des produits et du commerce international de la FAO. Il entretient des contacts réguliers avec les bureaux nationaux, sous-régionaux et régionaux de la FAO, ainsi qu'avec les principales unités techniques de la FAO pour mettre en commun les informations et élaborer des méthodologies. Le but du système est de fournir aux décideurs et aux organismes d'aide des informations aussi précises et récentes que possible sur tous les aspects de l'offre et de la demande d'aliments. Pour cela, le SMIAR prépare régulièrement des bulletins sur la production et sur les marchés des différentes cultures vivrières aux niveaux mondial, sous-régional et national (FAO, 2003).

Pour ses activités de suivi de campagne, le SMIAR est assisté par l'Unité de gestion de l'information sur l'environnement (SDRN) de la FAO qui lui fournit des images satellitaires en temps réel à l'aide du Système d'information et suivi en temps réel de l'environnement en Afrique (ARTEMIS), ainsi que des évaluations agrométéorologiques menées par le Groupe Agrométéorologie de la FAO. L'information concernant les mouvements migratoires des ravageurs ainsi que les opérations de traitement sont fournies régulièrement par le Centre d'intervention antiacridienne d'urgence (ECLO) et le Système de prévention et de réponse rapide contre les ravageurs et les maladies transfrontalières des animaux et des plantes (EMPRES). Les premières estimations de récolte (figure 2) sont établies puis révisées lorsque les chiffres officiels sont disponibles.

Dans les pays où il est difficile d'avoir un flux continu d'informations fiables en provenance du terrain sur les conditions agrométéorologiques et l'état des cultures, le SMIAR en collaboration avec l'ARTEMIS, établit un système de suivi des cultures basé sur une imagerie satellitaire en temps réel. Les données reçues directement par ARTEMIS en provenance du satellite européen METEOSAT sont utilisées pour la production d'images décennales de la durée de présence des nuages à sommets froids (CCD) sur le continent africain. Ces images permettent d'estimer les précipitations, car ce type de couverture nuageuse est souvent générateur de pluies et une durée prolongée de sa présence au-dessus d'une zone permet de supposer des précipitations significatives. Cela permet aux spécialistes du SMIAR d'identifier les régions souffrant d'un déficit hydrique ou d'une sécheresse en comparant les images de la campagne en cours à celles des années précédentes ou d'une moyenne de la série historique nationale (FAO, 2003).

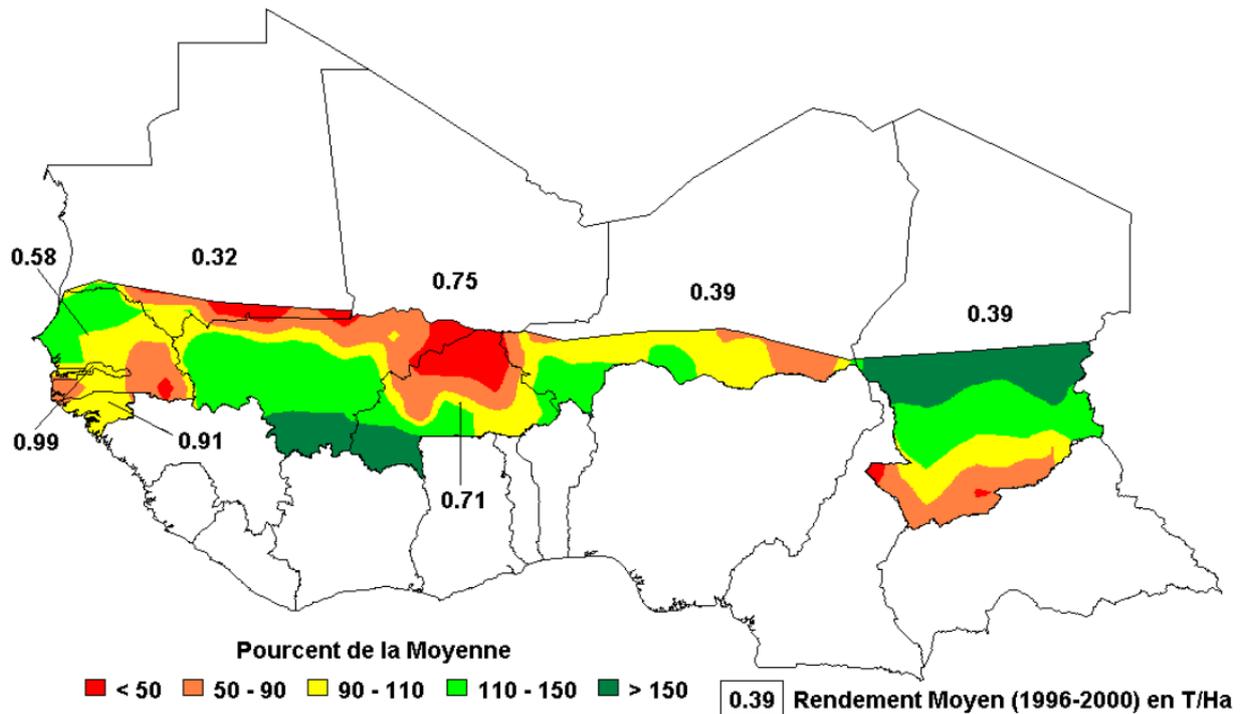


Figure 2 : Exemple de carte (tirée du rapport n° 4 du 7 septembre 2001) produite par le SMIAR présentant les prévisions de rendement du mil au 31 juillet au Sahel pour la saison agricole 2001. Les pourcentages sont calculés par rapport au rendement moyen des 5 dernières années (1996-2000)

En complément de ce suivi des précipitations, le système fait largement usage des images de l'Indice de végétation de la différence normalisée (NDVI) qui fournissent une indication sur la vigueur et l'étendue de la couverture végétale. Cela permet aux spécialistes du SMIAR de suivre l'évolution des conditions de croissance des cultures tout au long de la campagne. Les données obtenues à partir des satellites américains à orbite polaire de l'Administration Océanographique et Atmosphérique Nationale (NOAA) sont traitées par le Centre de vols spatiaux Goddard (GSFC) afin de produire des images de végétation décadaires ayant une résolution de 8 km et couvrant l'Afrique, l'Amérique latine et les Caraïbes (FAO, 2003).

Par ailleurs, le SMIAR mène des actions pour le renforcement des institutions nationales chargées du suivi de la sécurité alimentaire. La FAO fournit une assistance technique pour renforcer les services statistiques gouvernementaux et leurs unités spécialisées, dites Systèmes d'Alerte Rapide et d'Information sur l'Alimentation (SARIA). Les SARIA sont les points focaux nationaux qui collectent, traitent et communiquent les données sur toutes les variables qui déterminent la sécurité alimentaire. Outre la mise en commun des informations, des échanges importants de données, de méthodes et de logiciels existent entre les SARIA aux niveaux mondial, régional, national et local. Dans les pays ne disposant pas de SARIA, le SMIAR s'appuie sur un flux d'informations provenant

directement des services techniques appropriés du gouvernement, du personnel local de la FAO et des ONG (FAO, 2003).

Le SMIAR donne l'alerte quand des crises alimentaires sont imminentes de façon à permettre de planifier des interventions et d'éviter des souffrances humaines. Pour les pays en état de crise grave, le SMIAR et le Programme Alimentaire Mondial (PAM) mènent des missions d'évaluation des récoltes et de la sécurité alimentaire. Leur objet est de fournir des informations rapides et fiables de telle sorte que les mesures appropriées soient prises par les gouvernements, la communauté internationale et d'autres acteurs concernés (FAO, 2003).

Le SMIAR a publié un guide méthodologique intitulé « *Guidelines for Crop and Food Supply Assessment Missions* », qui détaille les méthodes d'évaluation rapide de la sécurité alimentaire dans des pays où les données chiffrées sont rares. Afin de gérer plus efficacement ses différentes bases de données, le SMIAR a développé un système d'information intégré appelé « Station de travail du SMIAR ». Cette station de travail est composée d'un ensemble de modules spécifiques, incluant un logiciel de gestion des bilans céréaliers par pays (CCBS), un logiciel d'affichage et d'analyse de cartes et d'images satellitaires (WinDisp), ainsi qu'un module de gestion des dépêches d'agences de presse (FAO, 2003; Rashid, 2009).

1.2.3 *Famine Early Warning Systems Network (FEWS NET)*

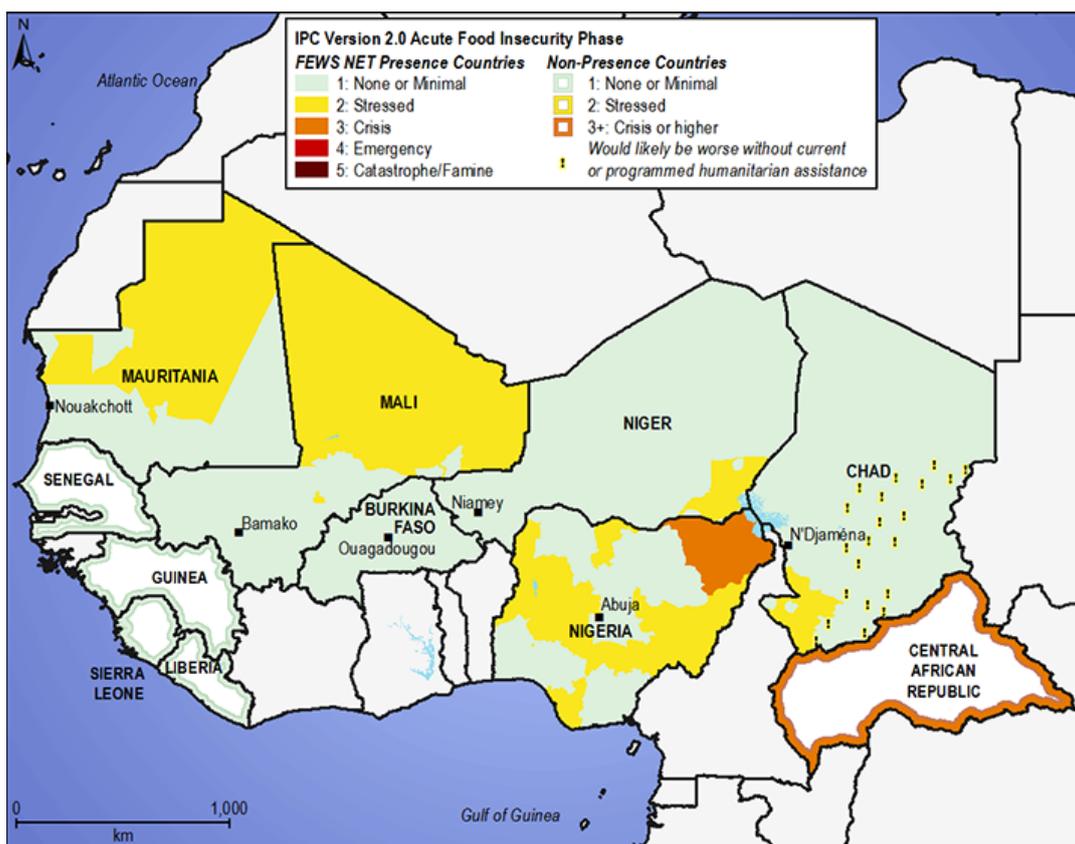
Le FEWS NET est un réseau d'alerte précoce, financé par l'USAID et qui fournit des informations d'alerte précoce et de vulnérabilité sur des questions de sécurité alimentaire. L'activité du FEWS NET est mise en œuvre par une société privée (*Chemonics International, Inc.*) et plusieurs agences du gouvernement américain qui sont l'Observatoire Géologique des États-Unis (USGS), l'Administration Spatiale et Aéronautique Nationale (NASA), la NOAA et le Département de l'Agriculture des États-Unis (USDA). *Chemonics* opère en Afrique subsaharienne, en Amérique centrale, en Haïti et en Afghanistan à partir de bureaux nationaux et 3 bureaux régionaux de terrain (Ouagadougou, Nairobi et Pretoria).

Le FEWS NET fournit des informations pour définir et évaluer le niveau d'insécurité alimentaire, en utilisant l'analyse des modes de vie combinée à l'analyse détaillée des marchés. Un mode de vie peut être défini comme l'ensemble des façons par lesquelles les ménages obtiennent les choses nécessaires à la vie, comment ils joignent les 2 bouts d'année en année et comment ils survivent (ou n'arrivent pas à survivre) pendant les périodes difficiles. L'approche basée sur les modes de vie utilisée pour analyser la sécurité alimentaire est l'approche de l'économie alimentaire ou du ménage, développée en premier par l'organisation « *Save the Children United Kingdom* » dans les

années 1990. Le principe de base est qu'une analyse des modes de vie locaux est essentielle pour une bonne compréhension de l'impact - au niveau du ménage - des risques tels que la sécheresse, un conflit ou la désorganisation du marché (Seaman *et al.*, 2000).

Une fois que des problèmes sont identifiés, le FEWS NET utilise un ensemble de produits de communication pour informer les décideurs dans le but d'agir et atténuer l'insécurité alimentaire. Ces produits incluent des bulletins de mises à jour mensuelles de l'état de sécurité alimentaire pour 25 pays, des bulletins d'alerte ou des cartes (figure 3) (USAID, 2013).

Pour favoriser la durabilité, le FEWS NET fournit une assistance technique aux principaux systèmes nationaux et régionaux d'alerte précoce. Le FEWS NET collabore avec des agences aux niveaux international (FAO, PAM et UE), régional (SADC, CILSS, IGAD, Centres de surveillance de la sécheresse) et national pour améliorer les méthodologies d'analyse et de détection précoce de la vulnérabilité.



Source : (USAID, 2013)

Figure 3 : Exemple de carte produite par le FEWS NET présentant les conditions estimées de la sécurité alimentaire pour la période juillet-septembre 2013

1.3 Méthodes de prévision des rendements au Sahel

Les méthodes de prévision des rendements comprennent les enquêtes agricoles, les méthodes qualitatives et les modèles de prévision.

1.3.1 Enquêtes agricoles

L'objectif des enquêtes est de fournir des données sur les productions agricoles, les niveaux des stocks céréaliers des agriculteurs et sur les récoltes attendues (prévisions). Dans les pays du CILSS, la plupart du temps ce sont les services statistiques du ministère de l'agriculture qui en sont responsables. L'enquête couvre l'ensemble des exploitations traditionnelles. Le plan de sondage, aléatoire, est à base démographique à différents degrés selon les pays. Généralement, le premier degré est le village (ou la communauté rurale) et le second degré est l'exploitation agricole.

Au Sénégal, c'est la Direction de l'Analyse, de la Prévision et des Statistiques Agricoles (DAPSA) qui est responsable de l'enquête. L'enquête agricole se déroule annuellement pendant 4 mois selon le calendrier du CILSS. Depuis la mise en place des méthodes DIAPER, les enquêtes agricoles annuelles sont réalisées par les agents des Services Départementaux du Développement Rural (SDDR) sous le contrôle de la DAPSA. L'univers statistique est le département.

1.3.1.1 Méthode d'échantillonnage

Au Sénégal, les enquêtes reposent sur un sondage probabiliste stratifié à deux degrés avec comme unités primaires les districts de recensement (DR), et comme unités secondaires les exploitations ou ménages agricoles. Le DR est une unité aréolaire définie pour les besoins du Recensement Général de la Population et de l'Habitat (RGPH) de 2002. Ce sont de petites unités géographiques de 800 à 1000 habitants qui peuvent correspondre à un ensemble de villages, un seul village ou à une partie d'un village si celui-ci est vaste. Le nombre de DR à considérer dans l'échantillon est fixé proportionnellement au nombre de DR dans le département. Ce nombre varie généralement de 10 à 30 selon le département. L'enquête couvre tout le territoire national à l'exception des zones encadrées comme celles de la Société Nationale d'Aménagement et d'Exploitation des Terres du Delta (SAED) ou de la Société de Développement et des Fibres Textiles (SODEFITEX) et des zones urbaines comme Dakar, Guédiawaye et Pikine. Pour l'enquête agricole 2011-2012, 850 DR et 5726 ménages agricoles ont effectivement été enquêtés.

1.3.1.2 Estimation des superficies cultivées

L'estimation des superficies consiste à mesurer les superficies de tous les champs cultivés par 4 ménages sélectionnés dans chaque DR. La mesure des superficies est effectuée à l'aide de matériel topographique simple (boussole, jalon, ruban métrique, calculatrice programmable et GPS).

La superficie totale cultivée en chaque culture principale est déterminée pour chaque ménage enquêté. Par la suite la superficie de la culture est estimée au niveau du département en tenant compte du nombre de ménages enquêtés et du nombre total de ménages du département. La superficie de la parcelle est exprimée en hectare.

1.3.1.3 Estimation des rendements moyens départementaux

L'estimation du rendement concerne seulement 12 DR dans chaque département. La mesure des rendements est effectuée sur 5 champs choisis au hasard parmi l'ensemble des champs des 4 ménages enquêtés du DR.

En pratique, un carré de rendement est posé dans un champ donné. Les dimensions des carrés sont fixées avant le début de l'enquête et sont fonction de la culture :

- 5 m de côté pour l'arachide, le niébé et le bissap ;
- 10 m de côté pour le mil, le maïs et le sorgho ;
- 1 m de côté pour le riz pluvial.

La récolte des carrés est effectuée par les agents des SDDR. Elle est par la suite séchée puis battue. La pesée de la récolte est effectuée pour déterminer le poids sec de grains.

Après la collecte des informations, les questionnaires sont acheminés à la DAPSA à Dakar où elles sont saisies. Le dépouillement, le traitement et l'archivage des informations sont effectués à l'aide des logiciels CS Pro (U.S. Census Bureau et ICF International, 2013) et SPSS (IBM Corp., 2012).

Les enquêtes sont cependant très coûteuses et nécessitent un personnel nombreux sur le terrain. L'erreur systématique peut être importante si les enquêtes ne sont pas soigneusement menées et contrôlées. En outre, les résultats définitifs arrivent en général bien après la fin de la campagne.

1.3.2 Méthodes qualitatives

Les méthodes qualitatives reposent sur la connaissance du terrain par des spécialistes. Ces derniers émettent des opinions à partir d'observations agrométéorologiques. Ces observations tiennent compte du déroulement de la campagne et de la physionomie des cultures, et surtout font référence aux productions et rendements des années antérieures. Les spécialistes traduisent par la suite ces opinions en données chiffrées. Cette méthodologie sert parfois à vérifier la vraisemblance des prévisions faites par d'autres moyens. Elle est beaucoup utilisée dans le cas de l'évaluation des pertes dues aux calamités naturelles (FAO, 2000).

1.3.3 Modèles de prévision

Les modèles de prévision peuvent être subdivisés en 2 principaux groupes : les modèles empiriques et les modèles mécanistes.

1.3.3.1 Modèles empiriques

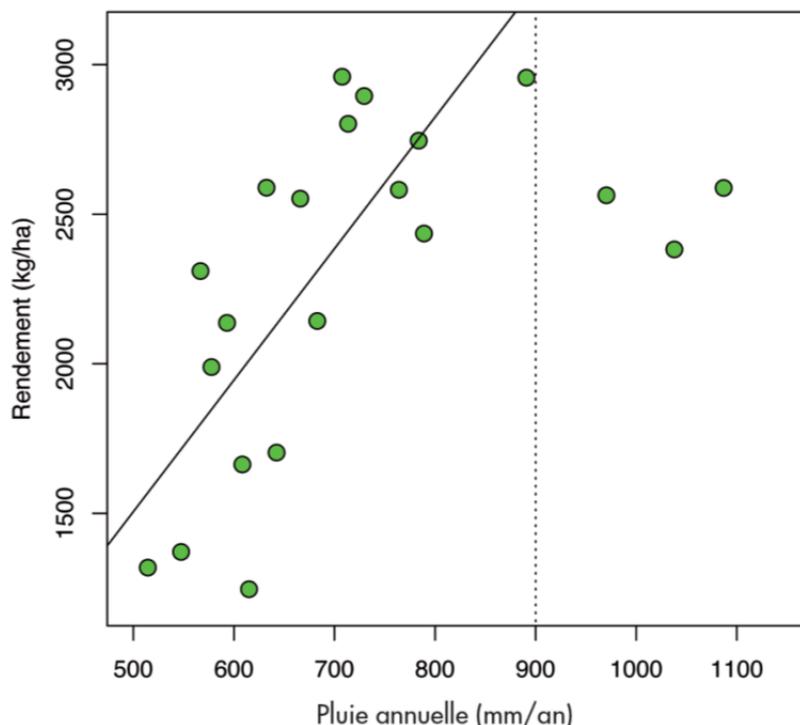
Les modèles empiriques, dits aussi modèles statistiques, décrivent l'évolution d'un système au travers de relations simplifiées entre les différentes variables sans faire de référence précise au fonctionnement biologique ou physique, ni fournir d'explications. Ils n'ont pas de fondement théorique mais reposent plutôt sur un raisonnement intuitif ou corrélatif. Les équations décrivant les relations sont dites de régression. La difficulté de ces modèles réside surtout dans le choix des variables explicatives, souvent très nombreuses (Dagnélie et Palm, 1993). Les modèles empiriques sont orientés davantage vers l'application et ils sont surtout utilisés par les intervenants du milieu agricole. Ce type de modèle fournit une prédiction de rendement pour une région donnée et est rarement transposable à d'autres régions. La fiabilité de ce type de modèles dépend de la quantité et de la qualité des données utilisées lors de sa définition.

La figure 4 montre le résultat d'une relation statistique entre la pluviométrie et le rendement du coton au Mali obtenue par Sultan *et al.* (2010). La relation entre la pluie annuelle et le rendement du coton est linéaire lorsque le cumul pluviométrique annuel est inférieur à 900 mm.an⁻¹.

1.3.3.2 Modèles mécanistes

Les modèles mécanistes décrivent et quantifient les mécanismes et les processus qui interviennent au niveau de la plante et du sol en se basant sur la formalisation d'hypothèses concernant les fonctionnements physiologique et physique du système étudié. Ils sont basés sur des fonctions mathématiques qui modélisent des relations précises de cause à effet. Parmi ces modèles, il y a les

modèles agrométéorologiques, relativement simples et comprenant essentiellement un bilan hydrique, et les modèles de simulation de la croissance des cultures qui sont plus complexes car ils tiennent compte du fonctionnement de la plante, en particulier jusque dans l'élaboration du rendement.



Source : (Sultan *et al.*, 2010)

Figure 4 : Exemple de résultats d'une équation empirique montrant la relation entre le rendement du coton au Mali et la pluie annuelle

1.3.3.2.1 Modèles agrométéorologiques

La modélisation agrométéorologique consiste à définir des relations du premier degré entre le rendement et des paramètres météorologiques. Le principe des modèles agrométéorologiques est que les développements des biomasses et grains dépendent dans une large mesure des ressources en lumière et en eau disponibles. Ils reposent sur des bilans hydriques à la parcelle ou par zone, et la description de la croissance végétale est simplement résumée sous forme de relations statistiques censées rendre compte de tous les processus d'échange. Les modèles agrométéorologiques permettent de prévoir des rendements à l'échelle de stations pour déterminer en particulier des zones à risque (Di Vecchia *et al.*, 2003).

1.3.3.2.1.1 Système de suivi des zones à risques (ZAR)

Le système de suivi des zones à risques utilise un outil agrométéorologique appelé modèle « Zone à Risque » (ZAR) et dont les hypothèses sont basées sur le bilan hydrique et ses conséquences sur l'évolution des cultures. L'hypothèse principale qui sous-tend le ZAR est la comparaison du cycle des cultures et la durée de la saison agricole déterminée à partir de méthodes agrométéorologiques, avec un lien entre les exigences phénologiques des cultures et les réserves hydriques des sols. La méthode se compose des étapes suivantes (Bacci, 2005):

- la détermination de la première date favorable aux semis en humide pour les céréales pluviales : cette date a lieu durant la décade où les précipitations ont atteint le niveau minimal pour le semis en humide (20 mm) ;
- la vérification de l'installation des cultures : la quantité de pluie tombée dans les 2 décades qui suivent le semis doit permettre de satisfaire les besoins minimaux des cultures. La période qui suit le semis est une phase critique pour les plantes qui peuvent mourir si leurs exigences hydriques ne sont pas satisfaites d'une façon adéquate ;
- la détermination de la première date favorable au re-semis ;
- la détermination de la date définitive du démarrage de la campagne agricole ;
- l'estimation de la durée de la saison favorable aux cultures : la durée correspond à la période entre le semis définitif dans la campagne en cours et la date moyenne de la fin de la saison. Les zones où il est prévu une période trop brève par rapport aux exigences phénologiques des cultures (70 jours) sont classées comme des zones à risque ;
- la vérification de l'évolution de la végétation dans les différentes zones agricoles de chaque pays : la morphologie du profil du NDVI dans le temps est un indicateur de l'état du développement des cultures.

L'échelle temporelle utilisée est la décade car les images d'estimation des pluies et de l'indice de végétation sont produites avec une périodicité décadaire. Archivées sur le serveur du CRA, ces images sont produites et fournies par l'Institut Flamand de Recherche Technologique (VITO) dans le cadre d'une collaboration entre le CILSS et l'UE. Le ZAR permet de localiser les différentes zones à risque avec une précision de 3 km (taille du pixel) et d'en déterminer les localités concernées, l'étendue spatiale et le nombre d'habitants vivant dans ces zones grâce à l'utilisation des bases de données existantes. Le degré de sévérité des crises s'apprécie par comparaison avec une situation normale ou une année de référence des différents indicateurs (Di Vecchia *et al.*, 2003).

1.3.3.2.1.2 Système Intégré de Suivi et de Prévision des rendements (SISP)

Le SISP a été développé par le Centre d'Études pour l'Application de l'Informatique à l'Agriculture (CESIA) et l'Institut d'Agrométéorologie et Analyse Environnementale pour l'Agriculture (IATA) de Florence (Italie) en collaboration avec le service météorologique du Niger, le CILSS et le département de la coopération italienne. Le SISP est un modèle de simulation du mil au niveau station qui permet d'estimer les conditions de croissance du mil et l'effet de la distribution des précipitations sur la croissance de la culture et sur son rendement. La détermination des rendements est basée sur le concept de la réduction proportionnelle de la production à la contrainte due au facteur limitant pendant la saison de croissance. Le modèle SISP est structuré en 4 modules :

- un modèle de simulation du mil (module MILSUIVI) à faire tourner au niveau de la station afin d'estimer les conditions de croissance du mil et l'effet de la distribution des précipitations sur la culture et son rendement ;
- les procédures d'analyse statistique (module STATISTIQUES) sur les séries historiques des données de pluie pour produire des caractéristiques agroclimatiques (tableaux, graphiques et cartes pour les rapports décennaux produits périodiquement par les services agrométéorologiques et par les unités nationales d'alerte précoce) ;
- les procédures d'analyse des images NOAA-NDVI (module NOAA) pour le suivi des conditions de la végétation;
- un système de gestion des données pluviométriques (module GESTION BD).

Comme le ZAR, il permet d'évaluer les dates de semis et d'installation des cultures, d'évaluer les périodes de carence hydrique et le coefficient de réduction global du rendement maximal (Di Vecchia *et al.*, 2003).

1.3.3.2.1.3 Modèle Diagnostic Hydrique des Cultures (DHC)

Le modèle DHC est basé sur un bilan hydrique décennaire assez précis de la parcelle cultivée. Celui-ci permet de déterminer dans le temps l'évapotranspiration réelle de la culture puis les niveaux de satisfaction de ses besoins en eau (évapotranspirations relatives), en fonction de la pluie, du sol (réserve utile et ruissellement) et de la demande évaporative de référence. Le CRA utilise des données de précipitation quotidiennes de 180 sites, effectue les simulations et extrapole l'analyse pour la fin de la culture en utilisant des séries de données historiques. Les données d'ETP, quand elles ne sont pas disponibles, peuvent être obtenues par krigeage (une méthode d'estimation par interpolation spatiale). Les dates de semis sont généralement simulées en utilisant les critères paysans basés sur la pluviométrie.

Une équation empirique permet ensuite d'estimer le rendement moyen paysan de la zone située autour du site des mesures pluviométriques. Il a été montré que l'indicateur prévisionnel IRESP est fortement corrélé aux rendements paysans de mil lorsqu'ils sont agrégés au niveau villageois pour des recensements effectués au Sénégal, Mali, Burkina Faso et Niger en 1988-1990 (Forest et Cortier, 1991).

$$IRESP = \left(\frac{ETR}{ETM}\right) \text{ cycle de croissance} * \left(\frac{ETR}{ETM}\right) \text{ période critique} \quad (1)$$

$$\text{Rendement grains (kg. ha}^{-1}\text{)} = 11,3 * IRESP - 128 \quad (2)$$

Cette relation s'applique avec une bonne fiabilité ($R^2 = 66\%$) dans l'ensemble de la zone soudano-sahélienne.

DHC procure plusieurs indicateurs et informations : les dates de semis réussis en humide avec les zones de retard par rapport à la moyenne et à l'année précédente, des indicateurs de satisfaction des besoins en eau, les réserves hydriques des sols, les besoins en eau pour le bouclage du cycle et les rendements potentiels en milieu paysan. Une version modifiée appelé DHC-CP utilise les images du satellite METEOSAT et est couplée à un générateur de pluie probabiliste basé sur la chaîne de Markov pour reproduire des distributions statistiques de pluies en tous points d'une grille géo-référencée (Goze, 1990). Cette version, bien que fonctionnelle, n'est pas utilisée actuellement de façon systématique.

1.3.3.2.1.4 Télédétection

Selon la définition de la Commission interministérielle de terminologie de la télédétection aérospatiale française, la télédétection est l'ensemble des connaissances et techniques utilisées pour déterminer des caractéristiques physiques et biologiques d'objets par des mesures effectuées à distance, sans contact matériel avec ceux-ci. Plusieurs méthodes d'estimation des rendements et superficies sont basées sur des données de télédétection (Rasmussen, 1997). Parfois, ces données peuvent servir à re-calibrer certaines démarches de la modélisation. Elles peuvent aussi intervenir indirectement, lorsque certains paramètres d'entrée importants de modèles, tels que la pluviométrie, le rayonnement global ou l'évapotranspiration par exemple, peuvent être estimés ou interpolés dans l'espace de manière plus précise grâce aux satellites météorologiques (Genovese, 1997).

La prévision par télédétection est basée sur le calcul d'indicateurs qui sont mis en relation avec le rendement des cultures. Parmi ces indicateurs se trouve le NDVI qui est le rapport de la différence des réflectances des canaux PIR (bande Proche Infra-Rouge) et R (bande Rouge) sur leur somme.

$$NDVI = \frac{PIR-R}{PIR+R} \quad (3)$$

Le NDVI renseigne directement sur l'état des cultures et permet la comparaison de différentes récoltes. Les zones de végétation saines ont un NDVI plus élevé. Tout retard de croissance ou de mûrissement des cultures peut être détecté par comparaison avec la situation saine.

L'une des premières expériences d'application de la télédétection au Sahel a été faite au Niger dans le cadre du projet « Pilote de Prévision des Productions Agricoles au Sahel » (P4AS), mis en œuvre par le CIRAD au début des années 1990. Son but était de développer un système intégré de prévision des productions agricoles adapté aux spécificités de l'agriculture sahélienne par l'utilisation des images du satellite météorologique NOAA-AVHRR. Le satellite NOAA-AVHRR fournit à des pas de temps journaliers des mesures radiométriques dans la bande du rouge et du proche infrarouge, avec une résolution spatiale de 1 km. Traitées par une station installée à Niamey (Niger) et complétées par des observations de terrain, ces images satellitaires permettent au CILSS d'établir en temps utile les prévisions de récoltes nécessaires à la gestion de l'aide humanitaire et à l'approvisionnement des zones déficitaires à partir des régions excédentaires. Une relation reliant l'efficacité de conversion à un indicateur de stress hydrique a été introduit dans le modèle de Monteith (1984). Cet indicateur est estimé à partir de données satellitaires. Il s'agit du *Stress Degree Day* (SDD) calculé selon la formule suivante :

$$SDD = \sum_{j=1}^{j=n} (Ts - Ta) \quad (4)$$

où Ts et Ta représentent respectivement la température de brillance dans l'infrarouge thermique et la température de l'air. Ts est calculée par la méthode de la *Split Window* améliorée qui est la combinaison des canaux thermiques T4 et T5 de AVHRR et d'un indice de végétation (Kerr *et al.*, 1992) et Ta est simulée par un modèle de circulation générale.

Le calcul du SDD se fait sur une période d'intégration démarrant 20 jours après le semis et se terminant 20 jours avant la récolte (Begué, 2002). Cette relation, établie en 1991, a été appliquée aux données NOAA-AVHRR acquises en 1992 et a permis d'établir des cartes de rendement du mil. L'erreur maximale commise dans l'estimation est de 24,1% pour la matière sèche et de 43,16% pour le grain (Ouaidrari, 1994).

Depuis 2003, le CRA utilise la méthode « Groten » (Groten, 1993), développée par l'*International Institute for Aerospace Surveys and Earth Sciences* (ITC) et la méthode « Maselli » (Maselli *et al.*, 1992), développée par le CESIA pour l'évaluation des rendements agricoles (Moussa, 2005). Ce sont des méthodes opérationnelles pour le traitement des données NDVI visant le suivi de

l'environnement et plus spécifiquement à l'évaluation et la prévision des récoltes dans les régions du Sahel. Les 2 méthodologies sont basées sur le même principe. Elles s'appuient sur des études expérimentales pour chercher une relation utilisant les données satellitaires et la pluviométrie ou le rendement. Le but est de travailler de façon opérationnelle pour la prévision des rendements agricoles à l'échelle des entités administratives pour lesquelles les données de rendement des années antérieures existent (Moussa, 2005). La méthodologie appliquée est basée sur la corrélation entre les valeurs de NDVI maximum par décade et les rendements finaux. L'utilisation de ces méthodes a permis d'effectuer une estimation précoce des productions au niveau des provinces pour le Burkina Faso et des départements pour le Sénégal. A travers l'analyse des corrélations, la meilleure période pour la prévision des rendements a été identifiée à la fin du mois d'août (Moussa, 2005).

1.3.3.2 Modèles de simulation des cultures

Les modèles de simulation des cultures, aussi appelés modèles écophysologiques, sont des outils mathématiques et informatiques qui simulent le fonctionnement dynamique d'une culture (système sol-plantes) en interaction avec le climat et les pratiques agricoles. Ils ont été développés depuis une quarantaine d'années. Leur naissance correspond à une valorisation des travaux sur la photosynthèse et la respiration (De Wit *et al.*, 1970) avec une mise en relation entre la biomasse accumulée et les processus instantanés.

Ces modèles intègrent la plupart des processus physiologiques qui sont mis en jeu dans la chaîne de production végétale. Ils sont constitués d'un ensemble de relations mathématiques décrivant le fonctionnement du système sol-plantes en interaction avec le climat et les opérations techniques. Pour ces raisons, les modèles de culture sont aussi appelés modèles biophysiques ou encore modèles biotechniques. Les équations mathématiques, appelées formalismes, sont constituées de variables d'état qui caractérisent l'état du système à différents pas de temps, et de paramètres, qui constituent les constantes des équations mathématiques utilisées (Jones et Luyten, 1988).

Les variables d'entrées décrivent les conditions du système, tels que les états initiaux du sol, la météorologie journalière (rayonnement global, températures minimales et maximales, pluviométrie) et l'itinéraire technique. Les paramètres sont relatifs à des propriétés intrinsèques du système et ils gèrent les relations entre ses variables d'état. Leur valeur ne change pas durant les simulations. Les variables d'états (ou exploratoires) décrivent l'évolution du système au cours du temps. Les variables de sorties constituent les résultats de la simulation, intermédiaires ou finaux.

Une caractéristique majeure de ces modèles est leur structure élaborée et leur formulation mathématique plus ou moins complexe. Ils ont l'avantage de permettre de faire des simulations

souvent difficiles à réaliser expérimentalement. De ce fait, ils sont utilisés comme des outils de recherche. Le principal inconvénient de ces modèles est la difficulté de leur validation (Brisson, 2009).

Ces modèles gèrent au pas de temps journalier un développement du couvert reposant sur le fonctionnement carboné des plantes. Le rayonnement intercepté est transformé en biomasse qui, selon les choix de représentation du système, est répartie dans différents types d'organes. Cette répartition des assimilats repose sur des proportions préétablies en fonction des stades de développement ou sur des équilibres « sources-puits ». Dans tous les modèles de culture, c'est le flux de matière carbonée qui pilote le fonctionnement trophique de la plante. Il est accompagné, dans certains cas, d'un flux d'azote pouvant également être soumis à une loi de répartition entre organes. L'essentiel des autres processus est introduit dans les modèles comme des flux d'information servant à orienter, modifier ou limiter le flux de carbone (Brisson, 2009).

La construction d'un modèle commence par la question à laquelle le modèle permettra de répondre et le champ d'application. Des hypothèses sont ensuite exprimées et les concepts sur lesquels reposera le modèle sont définis. Il est alors possible de formaliser un jeu d'équations reliant les variables d'état aux paramètres et variables d'entrée et de délimiter leur domaine de validité (Smith, 2001).

L'étape suivante de calibration suppose que les formalismes sont exacts et s'attache à donner des valeurs aux paramètres par différents moyens et à les caler sur un jeu de données. Si le résultat de cette étape ne donne déjà pas de satisfaction, il faut retourner aux formalismes et éventuellement aux hypothèses de départ (Smith, 2001).

Une fois que le jeu de paramètres est considéré comme correct, il faut procéder à l'évaluation de la qualité prédictive du modèle (validation) sur des jeux de données indépendantes en confrontant ses résultats à la réalité. Si l'évaluation met en relief des défauts, il est nécessaire de retoucher aux paramètres et si l'échec persiste, il faut remonter les différentes étapes de construction du modèle. Finalement, le modèle peut être utilisé pour différentes applications en réponse à des objectifs divers à condition d'être dans son domaine de validité (Smith, 2001).

1.4 Conclusion

La prévision agricole est une activité stratégique des États qui leur permet de mieux gérer la sécurité alimentaire. Ceci est d'une importance capitale en zone soudano-sahélienne où la variabilité pluviométrique affecte fortement les agricultures essentiellement pluviales. Les

dispositifs d'enquête connaissent très souvent des problèmes de financement ou de mobilisation de fonds. D'autres outils comme la télédétection n'ont pas encore donné de résultats concrets au Sahel et leur application actuelle reste la plupart du temps dans le cadre de la recherche. Le principal outil de prévision des rendements, encore utilisé par le CRA, demeure le modèle DHC. Cependant, en dépit des progrès réalisés dans l'utilisation de cet outil, de nombreux efforts scientifiques doivent encore être consentis en matière de développement, d'adaptation, de validation et d'utilisation pour divers environnements, diverses cultures. Les modèles écophysiologiques se présentent ainsi comme une opportunité à exploiter.

Chapitre 2 : Étude et prise en compte en modélisation de l'effet de la latitude sur la réponse à la photopériode chez divers génotypes de mil (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.) du Sénégal

Ce chapitre est rédigé sous forme d'article qui a été accepté et publié le 30 juillet 2013 dans le numéro 67 de la revue « Journal of Applied Biosciences (ISSN 1997 - 5902) » (cf. annexe 2).

2.1 Introduction

Au Sénégal, les mils locaux constituent l'essentiel de la production céréalière et occupent une place importante dans l'alimentation humaine. La région sahélienne dont fait partie le pays représente un centre important de diversité des mils. La diversification des écotypes locaux, qui s'est effectuée sur plusieurs millénaires, a permis à ces derniers de s'adapter à la variabilité spatio-temporelle des pluviométries, principale contrainte des cultures dans la région (Traoré *et al.*, 2000). Cette variabilité entraîne en particulier une grande incertitude sur la date de semis qui, en un même site, peut se produire sur une période de près de 2 mois selon le démarrage des pluies (Sivakumar, 1988), alors que la variabilité de la fin de la saison des pluies est bien moindre (Traoré *et al.*, 2000). De nombreux travaux ont ainsi montré que l'adaptation des écotypes traditionnels consistait en leur faculté à caler leur cycle sur les dates de début et de fin de saison des pluies, ce du fait de leur caractère photopériodique (Cochemé et Franquin, 1967; Scheuring, 1996; Reyniers, 1998). En effet, le photopériodisme permet de faire que quelle que soit la date de semis, les floraisons se déroulent plus ou moins toujours à la même date, proche de la date moyenne de la fin de la saison humide, ce qui permet de limiter les moisissures, importantes en cas de floraison trop précoce, ou les stress hydriques finaux liés aux floraisons tardives, et également de minimiser les dégâts causés par les oiseaux du fait de la synchronisation des maturités (Curtis, 1968; Vaksman *et al.*, 1996). Cela assure aussi un séchage efficace des panicules qui arrivent à maturité après les dernières pluies. Pourtant, suite à la péjoration de la pluviométrie de la fin des années 60 (Le Barbé *et al.*, 2002), ce caractère a été systématiquement éliminé par les programmes de sélection pour ces zones pour créer des variétés à cycle fixe et plus court capables de supporter des saisons de pluies plus courtes (Dancette, 1983). Ce n'est que récemment que la photosensibilité a été réellement comprise par les sélectionneurs et agronomes comme étant un trait primordial d'adaptation à un climat fluctuant et aux contraintes biotiques de la zone sahélienne (Clerget, 2004; Folliard *et al.*, 2004; Kouressy *et al.*, 2008), dont les multiples avantages expliquent les préférences des paysans pour les écotypes locaux (Trouche *et al.*, 1998). Une bonne compréhension et la modélisation du photopériodisme sont donc primordiales pour pouvoir correctement prévoir les comportements des génotypes en fonction de leur environnement et des pratiques.

La modélisation de la réponse à la photopériode des mils et des sorghos tient compte des températures et durées du jour (Alagarswamy et Ritchie, 1991; Chanterreau *et al.*, 1997). Deux modèles ont fait longtemps référence : ceux de Franquin (1974) et de Major (1980). Le modèle de Major est fondé sur une augmentation linéaire de la photopériode avec la durée de la période végétative, exprimée en temps thermique, au-dessus du seuil de photopériode optimale. Le modèle de Franquin est de type hyperbolique et s'adapte bien au comportement des sorghos africains dont la durée de la phase végétative augmente de façon hyperbolique, s'accroissant rapidement au-delà d'un seuil lorsque la photopériode augmente, jusqu'à rendre impossible la floraison en jours longs. Ces modèles ne sont cependant pas adaptés lorsque le délai d'attente jusqu'à l'initiation paniculaire (IP) devient très long ou lorsque les plantes sont cultivées en dehors des périodes de semis normales (Clerget, 2004; Folliard *et al.*, 2004). Clerget *et al.* (2004) ont donc proposé de tenir aussi compte du sens de variation de la durée du jour ou de ses composantes, les heures de lever et de coucher du soleil. Cette amélioration a permis une bonne simulation de la phénologie des sorghos africains dans différents environnements. Mais malgré le nombre relativement élevé de paramètres et de variables explicatives (température, photopériode, sens de variation de la durée du jour), la phénologie dans certains environnements restait inexplicée. Pour résoudre ce problème, Folliard *et al.* (2004) ont proposé un modèle qui considère que les photopériodes élevées inhibent la mise à fleur et que l'IP se produit lorsque la durée du jour descend en dessous d'un seuil qui dépend de l'âge de la plante. Ces résultats ont été à la base du développement du modèle Impatience (Dingkuhn *et al.*, 2008) qui semble à ce jour être le plus adapté aux écotypes soudano-sahéliens de mil et sorgho.

Le principe du modèle Impatience est que l'initiation paniculaire se produit lorsque la photopériode descend en dessous d'un seuil qui dépend de la variété et de l'âge de la plante. Ce modèle de réponse à la photopériode a été incorporé dans le modèle de simulation du développement des cultures SARRA-H (Dingkuhn *et al.*, 2003). SARRA-H est un modèle à base écophysologique développé par le CIRAD en collaboration avec le Centre d'Étude Régional pour l'Amélioration de l'Adaptation à la Sécheresse (CERAAS) et le CRA. Il permet de simuler correctement les phénologies et les développements des biomasses et rendements des céréales, en particulier des écotypes africains traditionnels photopériodiques (Dingkuhn *et al.*, 2008; Traoré *et al.*, 2010). Mais récemment des études ont montré que la modélisation du phénomène n'est satisfaisante qu'à la latitude à laquelle les informations nécessaires au paramétrage du modèle ont été recueillies et qu'Impatience ne simule pas correctement les cycles lorsque l'on change de latitude (Abdulai *et al.*, 2012). Ce constat a mis en évidence une interaction entre la latitude et la réponse à la photopériode qui n'est pas encore comprise ni correctement intégrée à la modélisation. Par ailleurs au Sénégal

SARRA-H n'a été, jusqu'à maintenant, paramétré que sur le Souna 3, variété améliorée très peu photosensible, et ce sur la base d'expérimentations réalisées seulement à Bambey (Sarr *et al.*, 2004; Siéné *et al.*, 2010a, 2010b). Notre étude a ainsi pour objectifs de caractériser les variations de cycles de différents géotypes de mil cultivés au Sénégal sous différentes latitudes et d'améliorer la modélisation de leur réponse à la photopériode en conséquence.

2.2 Matériel et méthodes

2.2.1 Présentation des sites d'étude

Les essais ont été conduits lors de l'hivernage 2012 sur 3 stations expérimentales de l'Institut Sénégalais de Recherches Agricoles (ISRA), à savoir les stations de Ndiol (16,13°N, -16,32° O, 7 m), de Bambey (14,70° N, -16,48° O, 20 m) et de Kolda (12,85° N, -14,93° O, 16 m) (figure 5).

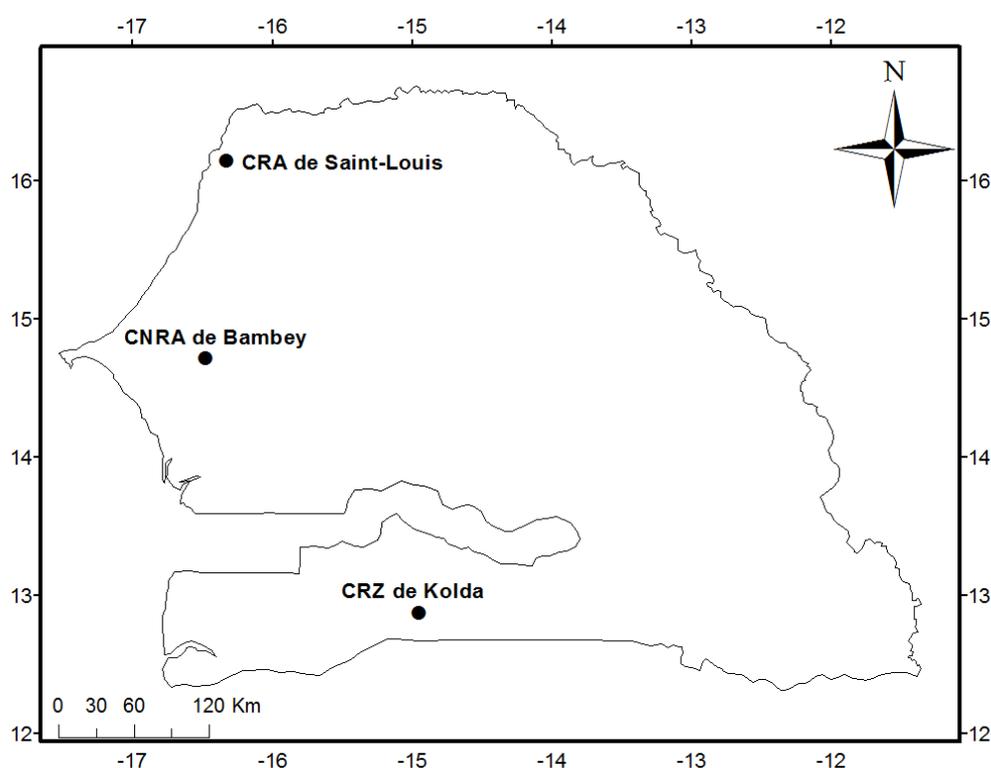


Figure 5 : Localisation des sites expérimentaux (CRA de St-Louis, CNRA de Bambey et CRZ de Kolda)

Les sols des essais sont de types brun-rouge subaride sur sable à Ndiol, ferrugineux tropical faiblement lessivé sur sable à Bambey et ferrugineux tropical lessivé sur grès sablo-argileux à Kolda. Le régime pluviométrique sur l'ensemble des sites est uni-modal avec des moyennes annuelles sur la période 1971-2000 de 189 mm à Ndiol, 436 mm à Bambey et 897 mm à Kolda. Les températures journalières minimales (maximales) sur la période de juin à novembre ont été en

moyenne de 22,9°C (33,3°C) à Ndiol, 23,5°C (35,2°C) à Bambey et 23,2°C (34,7°C) à Kolda. La durée astronomique maximale du jour est de 12,87 heures (12 h 51 mn 55 s) à Kolda, de 12,98 heures (12 h 58 mn 49 s) à Bambey et de 13,07 heures (13 h 04 mn 14 s) à Ndiol. Les écarts maximaux entre durées du jour sur la période de l'étude sont de 5'42 entre Ndiol et Bambey et de 6'90 entre Bambey et Kolda (figure 6).

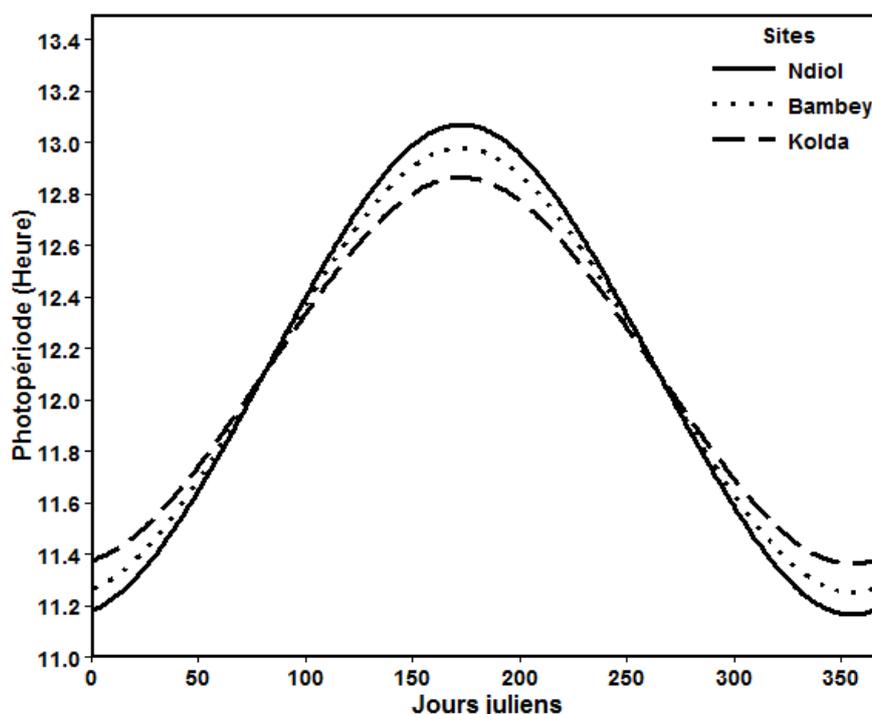


Figure 6 : Évolution de la photopériode sur les sites de Ndiol, Bambey et Kolda durant l'année civile

2.2.2 Matériel génétique

Le matériel végétal est composé de 2 variétés améliorées, de type Souna, et de 6 génotypes locaux dont 2 de type Souna et 4 de type Sanio, qui ont été collectés suivant un gradient latitudinal nord-sud en mai 2011 (tableau I). Les mils de type Souna sont des variétés précoces et peu sensibles à la photopériode. Les mils de type Sanio, dits tardifs, ont un cycle de développement long et sont très sensibles à la photopériode. Les 2 variétés améliorées sont le Souna 3 (variété très vulgarisée au Sénégal) et le Thialack 2. Le Souna 3 est une population synthétique issue d'un programme de sélection. Le Thialack 2 est une population locale améliorée. Les 6 génotypes locaux ont été désignés par le nom de leur village d'origine.

Tableau I : Caractéristiques des 8 géotypes de l'étude

Nom	Type	Cycle	Zone d'origine ou d'adaptation
Souna 3	Souna amélioré	précoce	Centre-nord
Thialack 2	Thialack amélioré	intermédiaire	Centre-sud
Backfassagal	Souna local	Précoce	Centre-nord
Diana Bah	Souna local	Précoce	Sud
Séfa	Sanio amélioré	Tardif	Sud
Koutima	Sanio local	Tardif	Sud
Maka Hamdallaï	Sanio local	Tardif	Centre-sud
Allahbougou	Sanio local	Tardif	Sud-est

2.2.3 Dispositif expérimental et conduite de la culture

Sur chaque site, l'essai a été semé à 3 dates, séparées d'environ un mois, à chaque fois selon un dispositif en blocs complets randomisés à un facteur qui est le géotype et à 3 répétitions. La parcelle élémentaire est constituée de 10 poquets disposés sur 2 lignes distantes de 0,8 m, avec un écart entre poquets de 0,8 m. Les semis ont été effectués en humide après labour les 12 juin, 10 juillet et 08 août 2012. Des irrigations ont été effectuées afin d'éviter tout stress hydrique qui pourrait affecter les phénologies. La fertilisation a été faite selon les recommandations de l'ISRA sur chaque site, soit 150 kg.ha⁻¹ de NPK au semis et 100 kg.ha⁻¹ d'urée dont la première moitié au démarrage et la seconde moitié en pleine montaison. Les désherbages et luttés contre les ravageurs et maladies ont été faits à la demande. Des parcelles additionnelles de 6 lignes de 7 poquets ont été semées à Bambey pour chacun des géotypes le 13 octobre sous les mêmes conditions agronomiques en vue de faire des observations destructrices des initiations paniculaires.

2.2.4 Observations et paramètres calculés

Le stade phénologique observé principalement est la date d'apparition de la ligule de la feuille paniculaire, dite aussi « feuille-drapeau ». Les variations de longueur du cycle liées à la sensibilité à la photopériode s'expriment en effet avant son apparition, alors que la fin du cycle varie peu, ne dépendant que des températures. De plus, il s'agit d'un événement facile à identifier, sans ambiguïté, ce qui n'est pas toujours le cas du stade de floraison. Les observations ont été faites sur chacun des 6 poquets centraux, en passant tous les 2 jours dans les parcelles. Cela a permis de déterminer les durées semis-ligulation de la feuille drapeau (SFD). Pour déterminer la date

d'initiation paniculaire (IP) dans les parcelles additionnelles, des dissections et observations visuelles ont été pratiquées régulièrement sur des pieds choisis de façon aléatoire. La période végétative sensible à la photopériode (notée ici PSP comme dans le modèle SARRA-H) est de durée nulle quand les plantes sont semées tardivement comme cela a été le cas pour le semis du 13 octobre. La détection de l'IP permet d'établir la durée de la phase végétative initiale non sensible à la photopériode (BVP) et celle de la phase de développement allant de l'IP à la ligulation de la feuille drapeau (IPFD). Les IPFD ont ensuite été soustraites des SFD pour avoir les durées semis-initiation paniculaire (SIP) aux différentes dates de semis. Toutes les durées calculées ont été converties en temps thermique (temps perçu par les plantes en fonction de la température) selon l'approche *broken linear function* (Hammer et Muchow, 1994). Les températures de base, optimale et maximale ont été fixées respectivement à 11°C, 34°C et 46°C (Garcia-Huidobro *et al.*, 1982; van Oosterom *et al.*, 2001). Le coefficient de sensibilité au photopériodisme (Kp) a été calculé pour les différents génotypes selon la formule utilisée par Traoré *et al.* (2000).

$$Kp = \frac{SFD1-SFD2}{DS2-DS1} \quad (5)$$

avec SFD1 et SFD2, les nombres de jours entre le semis et la ligulation de la feuille drapeau pour les 2 premières dates de semis DS1 et DS2.

Kp varie de 0 pour les variétés insensibles à la photopériode à 1 pour les variétés strictement photopériodiques pour lesquelles le raccourcissement de la période végétative compense totalement la variation entre les dates de semis (Kouressy *et al.*, 2008).

2.2.5 Analyses statistiques

Le logiciel statistique R version 3.0.1 (R Development Core Team, 2013) a été utilisé pour les représentations graphiques et le calcul des intervalles de confiance au seuil de 5%.

2.2.6 Simulations de la réponse à la photopériode

2.2.6.1 Modèle utilisé

Le modèle de simulation du développement des cultures qui a été utilisé, SARRA-H (version 3.2) a été plusieurs fois décrit dans la littérature récente (Dingkuhn *et al.*, 2003; Baron *et al.*, 2005; Sultan *et al.*, 2005a, Dingkuhn *et al.*, 2008). Il intègre le modèle Impatience pour lequel l'IP est déclenchée selon les conditions suivantes :

$$\left(\frac{1000}{\sum_{i=BVP} dti} \right)^{Pexp} \frac{Pi - Pbase}{Psat - Pbase} \geq Psens \quad (6)$$

$\sum_{i=BVP} dti$ représente la somme des températures de la phase végétative. Pbase et Psat sont les limites inférieure et supérieure de durée de jour au-delà desquelles l'initiation paniculaire n'est plus possible. Pi est la photopériode réelle. Pexp et Psens sont des coefficients génétiques dépendant de la variété.

Le modèle est surtout sensible à la variation de Psens qui prend des valeurs proches de 0,4 pour des variétés très photopériodiques et supérieures à 1 pour des variétés insensibles à la photopériode. Pexp est généralement inférieur à 1 (Dingkuhn *et al.*, 2008).

2.2.6.2 Paramétrage du modèle Impatience et simulations

Le paramétrage du modèle Impatience peut être effectué par itération, soit en ajustant Psens et Pexp ensemble, soit en fixant Pexp à 0,17 et en ajustant uniquement Psens (Dingkuhn *et al.*, 2008). C'est la deuxième approche que nous avons utilisée.

Pour l'ensemble des variétés, les seuils critique et maximal de photopériode ont été fixés respectivement à 11 heures et 13,6 heures et Pexp à 0,17. La valeur de Psens qui a permis d'obtenir la plus petite valeur de la racine de l'erreur quadratique moyenne relative (RRMSE) (Willmott et Wicks, 1980; Willmott, 1982; Willmott *et al.*, 2012) a été retenue.

La RRMSE se calcule selon la formule suivante :

$$RRMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Pi - Oi)^2}{n \bar{O}}} \quad (7)$$

où Pi = valeur prédite, Oi = valeur observée, n = nombre de cas considérés, \bar{O} = moyenne des valeurs observées.

Le paramétrage ainsi obtenu sur le site de Bambey a été utilisé pour simuler les durées SIP sur les différents sites, et ceci aux 3 dates de semis.

2.3 Résultats

2.3.1 Effet de la date de semis sur les longueurs de cycle

La durée de la phase semis-feuille drapeau (SFD) permet bien de distinguer les Sanios, tardifs, des Sounas, précoces (figure 7). Pour le semis du 12 juin, les génotypes tardifs ont une SFD variant de 2003°C.j à 1646°C.j à Ndiol, de 1892°C.j à 1561°C.j à Bambey et de 1768°C.j à 1308°C.j à Kolda. Dans ce groupe, les 2 génotypes originaires du Sud du Sénégal ont eu pour l'un (Sanio de Séfa) le cycle le plus long et pour l'autre (Sanio de Koutima) le cycle le plus court. Les génotypes de type Souna ont eu des SFD variant entre 1104°C.j et 997°C.j à Ndiol, entre 1046°C.j à 971°C.j à Bambey et entre 903°C.j et 839°C.j à Kolda. Dans ce groupe, le Thialack 2 a été le génotype le plus tardif. Pour l'ensemble des génotypes, la durée de la SFD est réduite au fur et à mesure que le semis est retardé. Cette réduction de cycle est beaucoup plus importante chez les génotypes tardifs. Entre les 2 premières dates de semis, elle varie de 343°C.j environ pour le Sanio de Séfa à 371°C.j pour le Sanio de Koutima. Chez les génotypes à cycle court, la réduction de cycle la plus importante est enregistrée sur le Thialack 2 (233°C.j) et la plus faible sur le Souna de Diana Bah (162°C.j).

2.3.2 Effet de la latitude sur le photopériodisme

Les SFD de tous les génotypes varient avec la latitude (figure 7). Les valeurs les plus élevées sont observées à Ndiol et les plus faibles à Kolda. L'effet de la latitude, plus marqué pour le semis précoce, s'estompe progressivement au fur et à mesure que le semis est retardé. Par ailleurs, la différence est plus importante entre Bambey et Kolda qu'elle ne l'est entre Bambey et Ndiol. Pour le semis du 12 juin, hormis le Sanio de Séfa où le phénomène est moins marqué, la différence sur les SFD entre Bambey et Kolda est au moins le double de celle entre Bambey et Ndiol. Pour le Souna de Diana Bah par exemple, elle est 8,5 fois plus élevée. La même tendance est observée au semis du 10 juillet où la différence sur les SFD entre Bambey et Kolda est 2 et 10 fois supérieure à celle entre Bambey et Ndiol, respectivement pour le Sanio de Maka Hamdallaï et le Thialack 2. Toutes les variétés de l'étude ont donc montré une sensibilité à la photopériode ($K_p > 0$).

Les K_p varient en fonction de la latitude et du génotype (figure 8). Les valeurs les plus élevées ont été observées à Ndiol et les plus faibles à Kolda. Les génotypes tardifs sont plus photopériodiques avec des K_p variant de 0,74 à 0,79 à Ndiol, de 0,58 à 0,74 à Bambey et de 0,46 à 0,60 à Kolda. Les génotypes à cycle court, faiblement photosensibles à Kolda, avec un K_p compris entre 0,08 et 0,23, se sont avérés moyennement photosensibles à Bambey et à Ndiol avec des K_p variant entre 0,3 et 0,51.

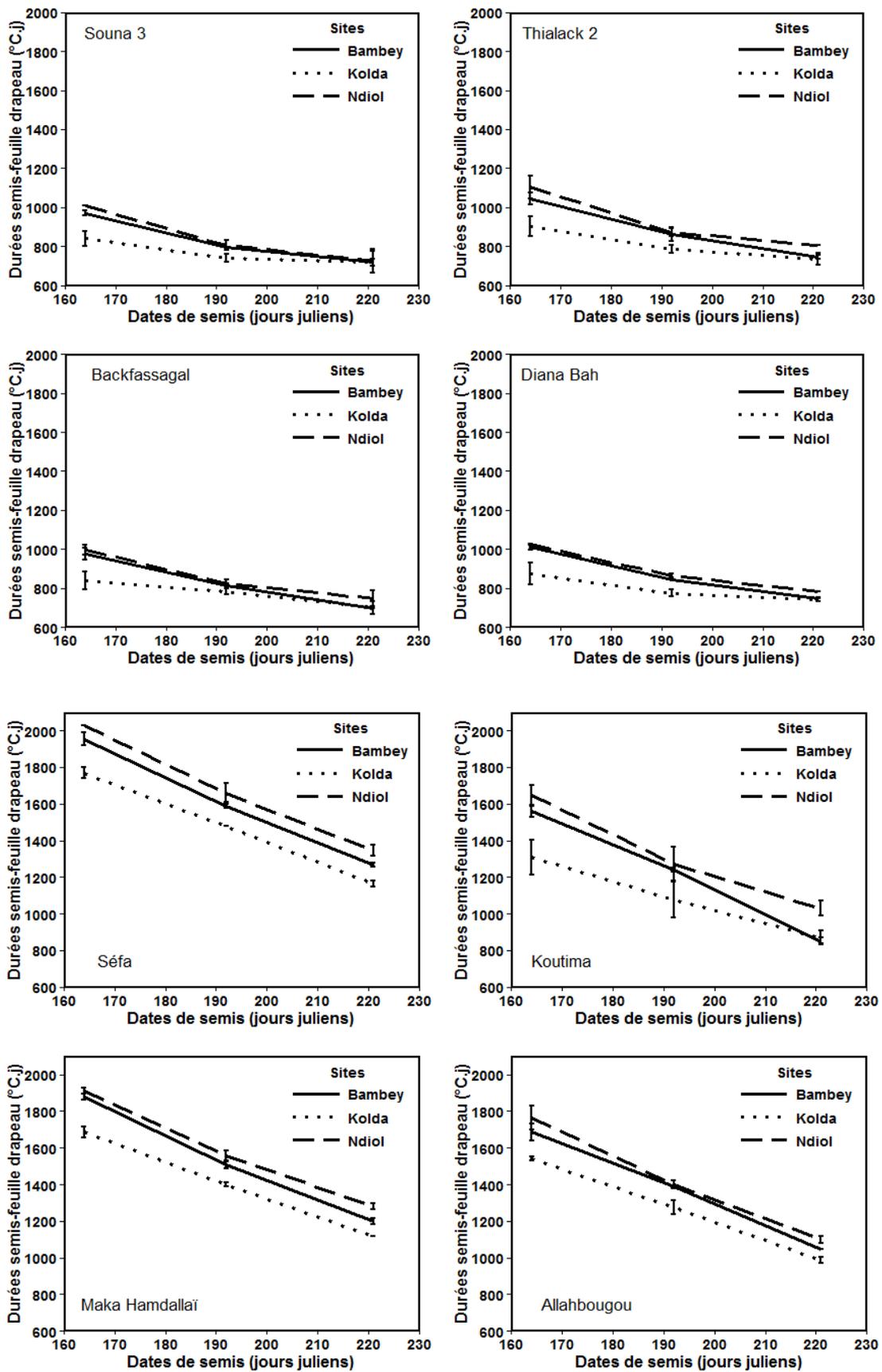


Figure 7 : Effet de la date de semis et de la latitude sur la durée semis-feuille drapeau (°C.j) des 8 génotypes sur les 3 sites. Les barres d'erreurs représentent les valeurs d'intervalles de confiance calculées au seuil de 5%

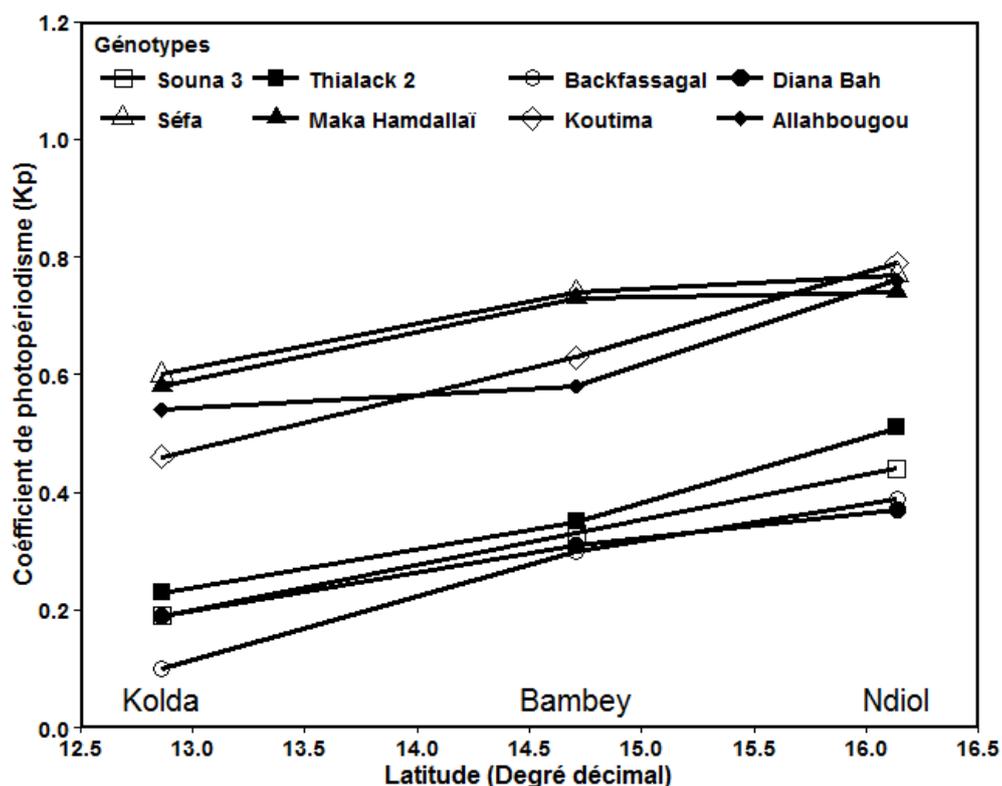


Figure 8 : Evolution du coefficient de photopériodisme des 8 géotypes en fonction de la latitude

2.3.3 Amélioration de la modélisation de la réponse à la photopériode

Les durées de BVP varient de 375°C.j à 423 °C.j. Elles ne dépendent pas de la longueur de cycle du géotype. Les coefficients Psens diminuent quand la latitude augmente. Ils sont cependant plus élevés à Bambey qu'à Ndiol pour les variétés précoces (tableau II).

Tableau II : Valeurs des coefficients génétiques obtenues lors du paramétrage du modèle Impatience

Géotype	Psens (Kolda)	Psens (Bambey)	Psens (Ndiol)	Phase végétative de base (°C.j)
Souna 3	0,80	0,76	0,79	386
Thialack 2	0,85	0,79	0,81	386
Backfassagal	0,80	0,77	0,81	403
Diana Bah	0,82	0,76	0,81	422
Séfa	0,45	0,41	0,40	423
Koutima	0,55	0,50	0,48	375
Maka Hamdallaï	0,45	0,41	0,41	408
Allahbougou	0,46	0,43	0,43	375

L'ajustement des paramètres effectué sur les résultats obtenus sur chaque site permet de simuler correctement les durées SIP des variétés du même site aux 3 dates de semis, avec des valeurs de RRMSE de 5,2%, 3,8% et 4,8% respectivement à Ndiol, Bambej et Kolda (figure 9).

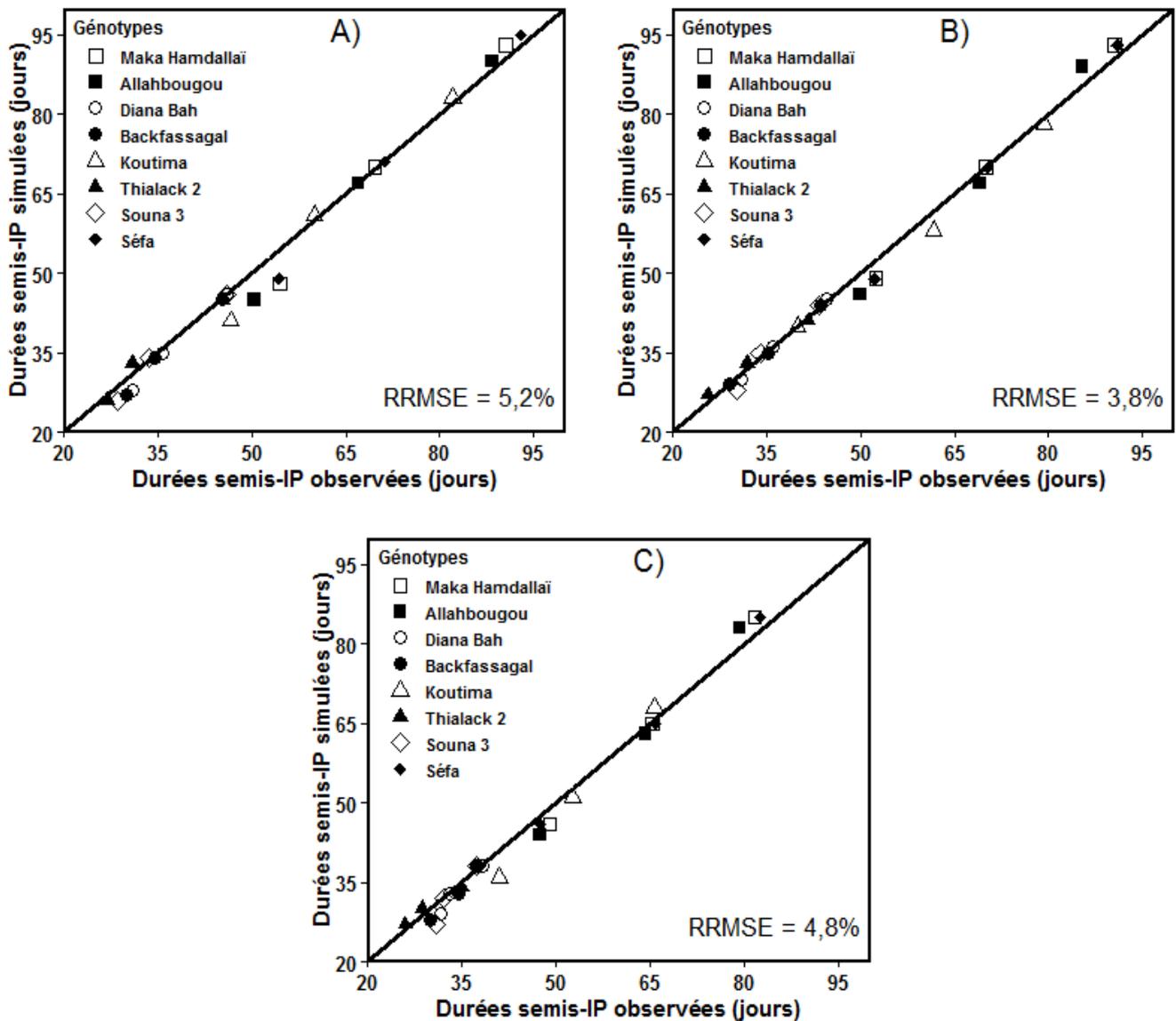


Figure 9 : Durées semis-initiation paniculaire (SIP) des sites de Ndiol (A), Bambej (B) et Kolda (C) simulées avec les paramétrages respectifs obtenus sur ces sites en fonction des durées semis-initiation paniculaire (SIP) observées correspondantes

Lorsque le paramétrage obtenu sur l'un des sites est utilisé pour effectuer les simulations sur les 2 autres, les résultats sont moins bons. Si par exemple le paramétrage établi à Bambej est utilisé pour faire les simulations sur les sites de Ndiol et de Kolda, les valeurs de RRMSE sont respectivement de 8% et 10%.

La méthode de correction proposée pour le sorgho au Mali (Abdulai *et al.*, 2012) a donc été utilisée. Elle consiste à établir, à partir des différentes valeurs de P_{sens} déterminées sur les différents sites et des latitudes des sites, une équation de régression permettant de déterminer la valeur de P_{sens} d'un site en fonction de sa latitude et d'une valeur de référence de P_{sens} établie dans un autre site. La méthode de correction a été développée en considérant chacun des 3 sites et en testant sur les 2 autres. Les meilleurs résultats sont obtenus quand Bambey est considéré comme site de référence, ce qui s'explique par le fait qu'il soit central. Mais quel que soit le site de référence, la méthode de correction permet d'améliorer les ajustements. L'équation établie à partir de nos données pour estimer le P_{sens} d'une variété en un site quelconque à partir de sa latitude et de son P_{sens} déterminé à Bambey est la suivante :

$$P_{sensSite} = 1,2468 * P_{sensBambey} - 0,0120 * P_{sensBambey} * LatSite - 0,0148 \quad (8)$$

avec $P_{sensSite}$ = coefficient génétique de photosensibilité pour le site, $P_{sensBambey}$ = coefficient génétique de photosensibilité à Bambey et $LatSite$ = latitude du Site. Le coefficient de détermination (R^2) de l'équation est de 99%.

Les paramétrages estimés ainsi ont été utilisés pour simuler les SIP sur les sites de Ndiol et Kolda. Cela améliore les simulations des durées SIP avec des valeurs de RRMSE proches de celles obtenues lorsque les paramétrages spécifiques de chaque site sont utilisés (figure 10).

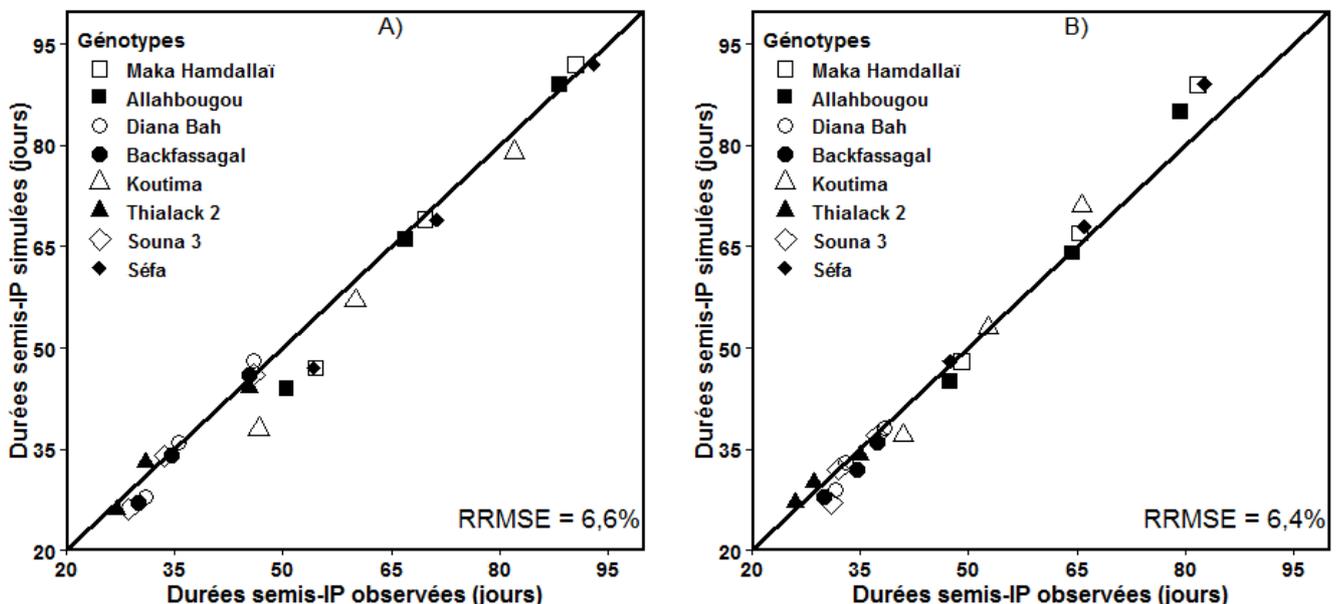


Figure 10 : Durées semis-initiation paniculaire (SIP) simulées avec le paramétrage ajusté à Ndiol (A) et à Kolda (B) en fonction des durées semis-initiation paniculaire (SIP) observées correspondantes

2.4 Discussion

L'étude a porté sur la caractérisation des variations de cycles de géotypes de mil en fonction des dates de semis et de la latitude en vue d'améliorer la modélisation de leur phénologie. L'originalité de la méthodologie réside dans l'utilisation d'un modèle de développement de culture en complément d'expérimentations multi-locales et à plusieurs dates de semis pour l'ajustement des paramètres du modèle Impatience. Le dispositif est similaire à ceux utilisés au Mali par les équipes de l'Institut d'Economie Rurale (IER) et du CIRAD qui travaillent depuis des années sur le photopériodisme (Vaksmann *et al.*, 1996; Kouressy *et al.*, 2008; Abdulai *et al.*, 2012). Au Sénégal, c'est la toute première expérience d'étude de la sensibilité à la photopériode et d'ajustement du coefficient P_{sens} d'un lieu à partir de sa latitude et du P_{sens} d'un site de référence.

Contrairement aux travaux de Curtis (1968) au Nigéria, qui ont montré que la date d'initiation paniculaire des variétés traditionnelles était indépendante de la latitude, les 8 variétés de l'étude (précoces et tardives) ont vu leurs durées SIP se raccourcir sous les faibles latitudes. Ce résultat, similaire à ceux de divers auteurs (Vaksmann *et al.*, 1996; Kouressy *et al.*, 2008; Abdulai *et al.*, 2012), s'explique par le fait que ces variétés étant de jours courts, et la durée du jour étant plus longue au nord sur la période de l'étude, cela entraîne une diminution de la durée de la période végétative lorsque l'on déplace une expérimentation du nord au sud. Ainsi, comme l'ont montré Kouressy *et al.* (2008), les variétés semées à basse latitude se montrent plus précoces, leur floraison est accélérée et leur cycle écourté. La durée SIP a également diminué au fur et à mesure que le semis était retardé. Ce phénomène est dû au fait que pour les semis précoces la durée du jour est trop élevée pour permettre l'initiation de la panicule ; alors la période végétative se poursuit jusqu'à ce que la durée du jour soit devenue suffisamment courte. Ce résultat est conforme à ceux obtenus par Folliard *et al.* (2004) et Kouressy *et al.* (2008). Par ailleurs, une étude menée par Vaksmann *et al.* (1998) a montré que les variétés originaires du Nord (haute latitude) étaient plus photopériodiques que celles du Sud, ce qui n'est pas le cas des variétés de notre étude dont les plus photopériodiques étaient en grande partie celles provenant du Sud. Cependant, le nombre restreint de notre échantillon ne nous permet pas d'être conclusif sur cette observation. Un plus grand nombre de variétés provenant de différentes latitudes aurait pu permettre de dégager une tendance claire sur la réaction photopériodique des géotypes en fonction de leur aire d'origine. L'ajustement du coefficient P_{sens} est très simple et trouve une application opérationnelle en modélisation des cultures et ses applications. Elle donne un paramétrage acceptable permettant ainsi de s'affranchir de la reprise de la détermination de P_{sens} à chaque latitude à travers des expérimentations coûteuses en temps et en argent. Le rôle de la latitude est très déterminant dans la procédure d'ajustement

mais reste encore incompris comme le soulignent Abdulai *et al.* (2012). Des études sont donc nécessaires afin de déterminer les mécanismes physiologiques qui sous-tendent son action.

2.5 Conclusion

L'étude a permis de montrer que la plupart des variétés traditionnelles, qu'elles soient précoces ou tardives, sont plus ou moins photosensibles en fonction de la latitude. Leur longueur de cycle augmente avec la latitude et diminue avec la date de semis. Le coefficient génétique (P_{sens}) d'une variété en un lieu donné peut être déterminé en fonction de la latitude de ce lieu et du P_{sens} d'un lieu de référence. Ce résultat peut trouver une application opérationnelle en modélisation des cultures et ses applications dont la prévision agricole. En effet, la simulation des rendements peut être effectuée sous différentes latitudes, sans être obligé d'effectuer de nouvelles expérimentations pour le paramétrage de la phénologie, une fois que l'équation d'ajustement est établie.

Chapitre 3 : Prédiction des rendements du mil (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.) au Sénégal : quel apport de 2 modèles écophysiologicals (SARRA-H et CELCIUS) à base bilan hydrique ?

*Une partie de ce chapitre a été soumise le 13 novembre 2013 à la revue « International Journal of Biological and Chemical Sciences (ISSN: 1991-8631) » sous le titre « Évaluation du modèle de culture PYE pour la prédiction des rendements du mil (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.) au Sénégal ».*

3.1 Introduction

Le contexte de l'agriculture au Sénégal, comme dans la plupart des pays sahéliens, est caractérisé par la faiblesse des précipitations et surtout leur très forte variabilité temporelle et spatiale (Baron *et al.*, 2005; Sultan *et al.*, 2008). Cette forte variabilité implique des risques et incertitudes importants qui expliquent les échecs des démarches d'intensification agricole classiques, à savoir l'utilisation de variétés modernes plus productives ou l'usage d'engrais minéraux (Binswanger et Sillers, 1983; de Rouw, 2004; Hallstrom, 2004; Hansen, 2005). Pour augmenter les productions, les agriculteurs ont basé leurs stratégies en bonne partie sur l'extension des superficies agricoles, l'étalement des semis dans le temps, le choix de plusieurs cultures et parcelles. Mais la pression démographique sans cesse croissante dans les zones rurales a eu pour conséquence la disparition de la jachère, principal moyen de restauration de la fertilité des sols dans les systèmes de culture soudano-sahéliens (Ramaswamy et Sanders, 1992). Les systèmes culturaux actuels, basés sur la culture continue, combinés aux déficits hydriques consécutifs, ont eu pour conséquence une raréfaction de la couverture végétale, rendant les sols plus vulnérables aux effets du vent et de l'eau (Niane Badiane *et al.*, 2000). Ainsi, les sols sont confrontés à un épuisement continu du fait de la non-restitution d'éléments minéraux. Cela favorise les adventices qui se développent de préférence dans les sols pauvres à structure dégradée, et qui sont responsables d'importantes pertes de production. La pression des adventices est d'autant plus marquée que les conditions climatiques sont plus favorables et/ou que les moyens (équipement en matériel de culture) sont plus faibles (Ndoye *et al.*, 1984). En particulier, le striga (*Striga hermonthica* (Del.) Benth) cause localement des dégâts importants surtout dans des champs exploités de façon continue (Ndoye *et al.*, 1984; Olivier, 1995). Doggett (1984) a indiqué que le striga pouvait causer des pertes de récolte de 60 à 70% sur le sorgho dans certains pays du Sahel, et que le taux pouvait être plus faible au Sénégal et en Gambie, du fait de l'effet antagoniste réel de l'arachide, qui couvre une année sur deux la plupart des terres céréalières. Des études récentes au Sénégal ont estimé sur le mil souba des pertes de rendement pouvant varier entre 30 et 52% (Wade et Kamara, 2007). Dans le cas d'attaque sévère, aucun épi n'est produit.

La baisse de la productivité des sols en milieu rural ainsi que les diminutions de rendement dues aux perturbations climatiques et biotiques entravent l'autosuffisance alimentaire d'une population rurale sans cesse croissante. Au Sénégal, le déficit en besoins céréaliers était de 818 092 tonnes en 2009 pour une production nette d'environ 1 631 814 tonnes, soit 30% (Ndiaye et Niang, 2010). La situation alimentaire et économique de la zone sahélienne, marquée par les récentes émeutes de la faim et les tensions sur les marchés internationaux (Janin, 2009; Bush, 2010), plaident donc pour une nécessaire augmentation des productions. Cette augmentation ne pourra se faire qu'au travers d'une intensification des productions. Plusieurs auteurs ont montré qu'il existe de très fortes marges de progression des rendements des céréales au Sahel, les rendements observés étant très inférieurs à ce que permettent notamment les conditions climatiques et les capacités de stockage en eau des sols (Pieri, 1989; Lobell *et al.*, 2009; Affholder *et al.*, 2013). Or l'absence de développement du recours aux intrants externes et de changement majeur dans les prix de vente du mil n'incitent pas les agriculteurs à l'intensification. La dépendance alimentaire céréalière s'accroît donc sans cesse. Dans ces conditions, il sera difficile de réduire fortement la dépendance alimentaire céréalière.

Dans ce contexte alimentaire précaire, pour gérer au mieux la sécurité alimentaire en anticipant et évitant les crises éventuelles, il est nécessaire pour les États de disposer d'outils leur permettant d'avoir une estimation précoce des productions (Samba *et al.*, 2001). Les modèles de culture permettent d'estimer, sur la base des conditions climatiques de la campagne, les rendements, et ce dès le début des récoltes, voire au cours de la campagne agricole (Samba *et al.*, 2001). A l'heure actuelle, le CRA, relayé par les Directions de Météorologie Nationale (DMN), réalise les prévisions pour les zones soudano-sahéliennes. Il utilise le modèle DHC (Samba, 1998; Samba *et al.*, 2001) qui couple un bilan hydrique à une relation empirique estimant le rendement moyen en mil d'un village. Le modèle DHC permet ainsi de s'affranchir d'une caractéristique spécifique des agricultures soudano-sahéliennes qui est la très forte variabilité des rendements au sein d'un même terroir agricole, donc entre des parcelles soumises à priori aux mêmes pluies, ce du fait de nombreux facteurs et en relation à une très faible intensification (Forest et Cortier, 1991; Affholder, 1994; Barbier, 1998). Mais le modèle DHC est désormais dépassé par les modèles de croissance des cultures (Baron *et al.*, 2005) et par ailleurs, il n'a en réalité été validé que pour le mil Souna (cycle de 90 jours) alors que le besoin d'utilisation sur une diversité de céréales (autres variétés de mil, sorgho, maïs) traditionnelles et photopériodiques est nécessaire (Diop *et al.*, 2005). Des travaux récents ont permis de développer et valider pour différentes conditions le modèle SARRA-H, un modèle écophysiological. SARRA-H traduit de façon satisfaisante les dynamiques de développement, des biomasses et des surfaces foliaires et le bilan hydrique des céréales. Il a en outre été calé sur plusieurs géotypes photopériodiques du Sénégal (cf. chapitre 2) et permet de

simuler leur comportement, et prévoir leur rendement dans de bonnes conditions culturales. Mais SARRA-H a été développé pour l'échelle de la parcelle agricole alors que la prévision des rendements nécessite la détermination d'un rendement moyen à l'échelle d'un village, voire de la région. Sultan *et al.* (2008) ont montré que les rendements moyens villageois au sein d'une région étaient bien corrélés à la variabilité des pluviométries enregistrées, et que SARRA-H pouvait permettre d'estimer de façon plus satisfaisante que DHC les rendements moyens villageois. Mais cette étude a été effectuée sur une seule campagne agricole, ne prenant pas en compte la forte variabilité inter-annuelle de la région. Par ailleurs, il semble que lors des années à forte pluviométrie, ce qui est de plus en plus le cas (Salack *et al.*, 2011), les rendements du mil sont très faibles. Des tentatives récentes pour déterminer une démarche simple de passage au « milieu paysan moyen » par la réduction uniquement du coefficient de conversion de l'énergie lumineuse (ϵ_b) s'est avérée peu performante (Muller *et al.*, 2009).

L'objectif de l'étude est de caractériser la variabilité des rendements des agriculteurs et d'en rechercher les causes, et d'évaluer l'apport de 2 modèles écophysologiques à base bilan hydrique pour la prévision des rendements. En plus de SARRA-H, le modèle « *CEreal and Legume crops Simulator Under changing Sahelian environment* » (CELSIUS) (Affholder *et al.*, 2013) sera utilisé. CELSIUS est un modèle conçu selon le principe de la modélisation *ad hoc* (Sinclair et Seligman, 1996) et développé en Visual Basic sous Microsoft Access. L'étude permettra ainsi d'évaluer l'apport d'un modèle se différenciant de SARRA-H de par sa fonction d'élaboration de rendement et de par sa prise en compte de la densité de semis.

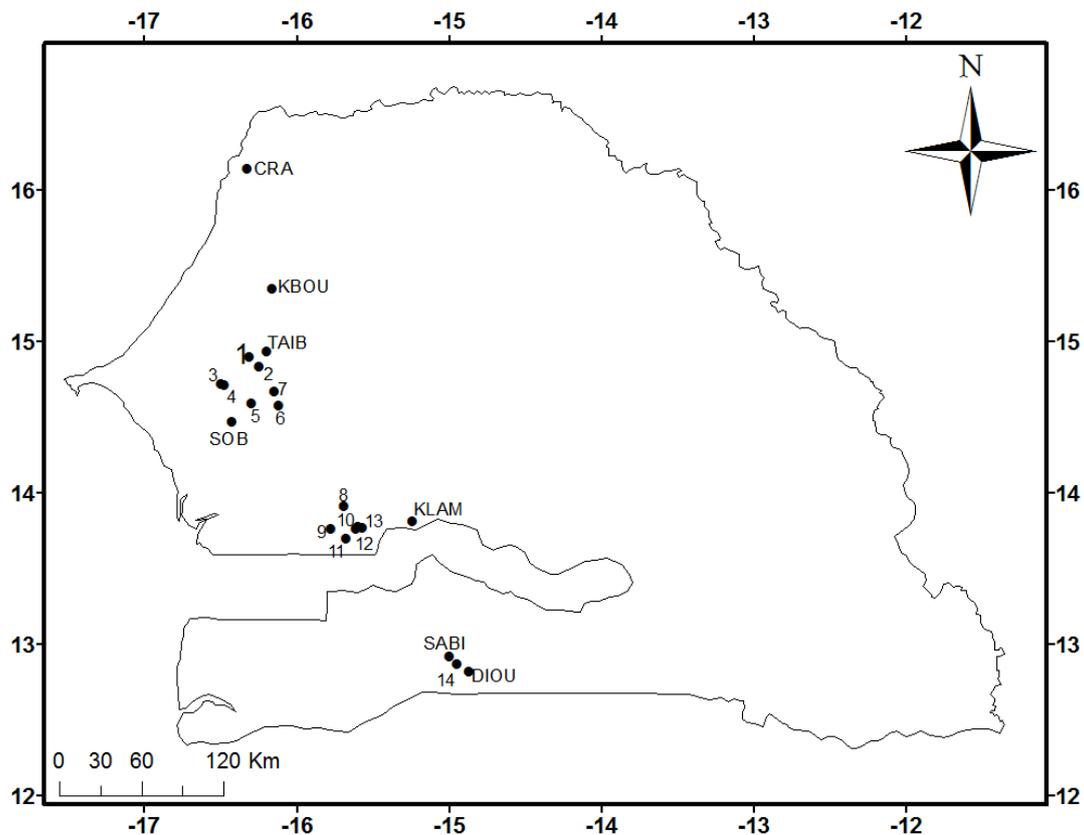
3.2 Matériel et méthodes

3.2.1 Présentation des sites d'étude

L'étude s'appuie sur des données collectées dans 18 villages au Sénégal (figure 11), et dont les caractéristiques sont présentées dans le tableau III.

Sur la période d'étude (1990-1991 et 2006-2012), le rayonnement global moyen journalier oscillait entre 14 et 25 MJ.m⁻².j⁻¹ à Bambey, entre 13 et 22 MJ.m⁻².j⁻¹ à Nioro et entre 10 et 26 MJ.m⁻².j⁻¹ à Kolda. La forte variabilité apparente du rayonnement global à Kolda vient du fait qu'il s'agit de valeurs d'un nombre limité d'années de mesure (figure 12A). Les moyennes journalières de la température minimale ont varié entre 15 et 25°C à Bambey, entre 13 et 26 °C à Nioro et entre 11 et 27 °C à Kolda. Les températures maximales journalières étaient comprises entre 31 et 42°C à Bambey, entre 31 et 43 °C à Nioro et entre 30 et 44°C à Kolda (figure 12B). Les pluviométries ont, selon l'année et le village, varié entre 197 et 801 mm dans le nord du Bassin arachidier, entre 331 et

1276 mm dans le sud du Bassin arachidier et entre 816 et 1132 mm en Haute-Casamance (tableau IV).



CRA= CRA de Ndiol, KBOU = Keur Boumi, TAIB = Taiba Sérère, SOB = Sob, KLAM = Keur Lamine, SABI = Saré Bidji, DIOU = Dioulacolon, 1=Djigueul, 2=Thiock Niang, 3=Bambey Sérère, 4=CNRA de Bambey, 5=Backfassagal, 6=Mbaena Wolof, 7=Diackael Dig, 8=Mabo, 9=Paoskoto, 10=Ndimb Taba, 11=Firgui, 12=Dialacouna, 13=Darou Khoudoss, 14=CRZ de Kolda

Figure 11 : Localisation géographique des villages d'étude

Tableau III : Caractéristiques des villages d'étude

Nom du village	Situation géographique	Type de sol dominant (Classification de Aubert, 1963)	Températures minimale et maximale annuelles (°C)	Pluviométries minimale et maximale annuelles (mm)
Keur Boumi, Bambey Sérère, Sob, Backfassagal, Mbaena Wolof, Diackael Dig, Taiba Sérère, Djigueul, Thiock Niang	Bassin arachidier nord, Centre-nord	Ferrugineux tropicaux faiblement lessivés sur sable	20-36	200-600
Paoskoto, Mabo, Firgui, Darou Khoudoss, Dialacouna, Ndimb Taba, Keur Lamine	Bassin arachidier sud, Centre-sud	Ferrugineux tropicaux faiblement lessivés sur sable	21-36	400-900
Dioulacolon, Saré Bidji	Haute-Casamance, Sud	Ferrugineux tropicaux lessivés	20-35	800-1300

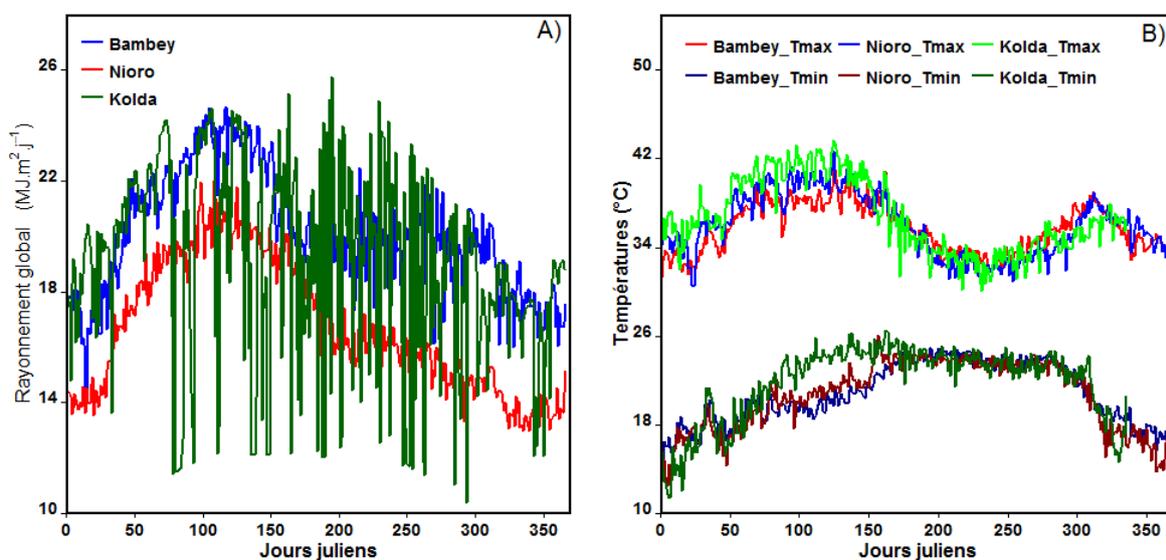


Figure 12 : Variation des valeurs moyennes journalières du rayonnement global (A) et des températures minimale et maximale (B) sur les périodes 1990-1991 et 2006-2012

Tableau IV : Pluviométries annuelles en millimètres des villages d'étude enregistrées lors des différentes années de suivi. Les lettres A, B et C entre les parenthèses traduisent le nombre de pluviomètres installés dans le village

Zone	Village	Pluviométrie (mm)								
		1990	1991	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Bassin arachidier nord	Keur Boumi (A)	203	197							
	Keur Boumi (B)	240	239							
	Djigueul			445	475	644				
	Taiba Sérère			529	440	543				
	Thiock Niang			443	557	425	512	356	331	
	Bambey Sérère (A)	365								515
	Bambey Sérère (B)	351								
	Bambey Sérère (C)	328								
	Diakael Dig			445	475	644				
	Backfassagal			381	606	647	632	663	379	801
	Mbaena Wolof			416	472	478				
	Sob (A)	325	374						556	542
	Sob (B)	327	373							
Bassin arachidier sud	Mabo								762	
	Paoskoto								657	619
	Firgui								693	
	Keur Lamine (A)	481	331							
	Keur Lamine (B)	469	363							
	Keur Lamine (C)		351							
	Ndimb Taba	439								
	Darou Khoudoss (A)	450	555							
	Darou Khoudoss (B)	450	586							
	Dialacouna (A)		621							
Dialacouna (B)		619								
Haute-Casamance	Saré Bidji								816	
	Dioulacolon								1 132	

3.2.2 Méthodologie de collecte des données des parcelles paysannes

L'espace agricole est généralement organisé en 2 zones concentriques. Autour des villages, dans une auréole d'étendue variable, le mil est cultivé en continu. Ce sont les champs de case (CC). Ces parcelles reçoivent régulièrement des apports d'ordures ménagères. En saison sèche, c'est aussi le lieu de parcage nocturne des animaux domestiques. Inversement, les champs de brousse (CB), plus éloignés, sont exploités de façon extensive et assure l'interface entre les champs de case et les zones de parcours (Pellissier, 1966).

Dans le cadre du projet ESPACE (1990-1991), l'échantillonnage de parcelles avait été raisonné en respectant les proportions de parcelles (en nombre) dans chaque auréole. Dans chaque village, 20 parcelles ont été retenues annuellement dans l'échantillon. Dans le cadre du projet AMMA (2006-2008), l'échantillonnage a consisté à tirer de façon aléatoire dans les listes de recensement des noms de chefs de « carrés ». Le « carré » est un ensemble de champs géré par plusieurs familles apparentées vivant ensemble. Les CB et les CC des « carrés » sélectionnés ont été retenus dans l'échantillon, à concurrence de 35 parcelles dans le village par an. Pour le projet Agrométéorologie du PPAAO (2009-2012), la méthodologie a été identique mais en limitant le nombre de parcelles à 8 CC et 14 CB. Par ailleurs, en 2010, 2011 et 2012, 4 CC et 8 CB ont été choisis de façon aléatoire parmi les 22 champs pour un essai qui permettait de créer des conditions très contrastées en terme de fertilité, en vue d'évaluer le poids de ce facteur dans la limitation des rendements. L'essai a consisté à délimiter une sous-parcelle de 400 m² dans le champ de l'agriculteur sur laquelle de l'engrais minéral a été apporté selon les doses recommandées de l'ISRA, soit 150 kg.ha⁻¹ de NPK au semis et 100 kg.ha⁻¹ d'urée en 2 apports (stades de démariage et de montaison). L'essai fertilité a concerné 146 sous-parcelles au total. Les suivis-enquêtes ont été menés à la fois sur la sous-parcelle et sur la partie restante du champ qui est conduite selon les pratiques culturelles habituelles de l'agriculteur.

Les suivis-enquêtes ont concerné 41 villages-années dont 29 du nord du Bassin arachidier (BAN), 10 du sud du Bassin arachidier (BAS) et 2 de la Haute-Casamance (H-C). Les réseaux de parcelles, 1071 parcelles dont 816 provenant du BAN, 215 du BAS et 40 de la H-C ont été suivis pendant toute la durée des saisons agricoles. Les informations recueillies à l'aide des questionnaires ont porté sur le passé cultural, en particulier les apports de fertilisants antérieurs, ainsi que l'ensemble des interventions des agriculteurs au cours de la campagne, le type de sol, l'état d'enherbement et la production des parcelles. Le rendement en grain (Yobs) a été déterminé à partir de la production de 3 placettes de 15 à 25 poquets suivant les zones et les années.

3.2.3 Pratiques culturelles dans les zones d'étude

Les modalités de travail du sol varient selon la zone. Dans le BAN, le travail du sol est presque inexistant : seulement 14% des agriculteurs pratiquent le grattage superficiel. Le travail du sol se fait à l'aide de charrue sur 50% des parcelles du BAS et sur la totalité de celles de la H-C.

Partout, les agriculteurs prélèvent les semences sur leurs récoltes. Le semis est pratiqué exclusivement en ligne et sans traitement préalable des semences dans 99% des cas. Il se fait majoritairement à l'aide du semoir attelé dans le BAN (98%) et le BAS (67%) et de semoir manuel en H-C (74%). La variété Souna est cultivée dans la plupart des villages, hormis Mabo et Paoskoto (Thialack) et Dioulacolon (Sanio). Les densités de semis sont faibles et peu variables dans le BAN (10 017 à 12 538 poquets.ha⁻¹). Elles sont plus variables dans le BAS et la H-C (11 185 à 36 399 poquets.ha⁻¹). Quelques cas d'associations avec le sorgho (20%) et le niébé (25%) ont été observés respectivement à Sob et à Backfassagal.

Le contrôle des mauvaises herbes se fait à travers 2 à 4 sarclages réalisés avec des houes ou des bineuses tractées à l'aide de bovins, d'équins ou d'arsins, et des travaux complémentaires manuels avec l'hilaire.

Traditionnellement, aucune fertilisation minérale n'est appliquée au mil. Dans le BAN, l'engrais minéral n'a été rencontré qu'à Bambey Sérère en raison sans doute de sa proximité avec le CNRA, mais seulement sur 13% des parcelles de mil suivies. Dans le BAS, son utilisation est plus fréquente (95% à Firgui, 67% à Darou Khoudoss, 45% à Keur Lamine, 29% à Ndimb Taba et 20% à Mabo). Dans ces villages, les parcelles de mil peuvent en effet bénéficier d'une partie de l'engrais réservé à d'autres cultures (coton, maïs). Cependant les doses appliquées sont très variables et restent très en deçà de celles recommandées. De plus, souvent les agriculteurs n'appliquent pas l'engrais de façon homogène mais privilégient des zones jugées moins fertiles. Il est donc difficile de quantifier les apports et d'appréhender leurs effets sur les rendements.

La fertilité est surtout gérée à travers les amendements organiques et les rotations culturales. La fumure organique est pratiquée sur la majorité des CC (61% dans le BAN, 74% dans le BAS et 87% en H-C) et dans des proportions moyennes sur les CB (38% dans le BAN, 49% dans le BAS et 40% en H-C). Fréquemment, c'est le fumier seul qui est utilisé dans le BAN (55% sur les CC et 75% sur les CB) et dans le BAS (54% sur les CC et 42% sur les CB). En H-C, le fumier est souvent associé au parcage (54% sur les CC et 50% sur les CB) (figure 13). Deux principaux types de rotations culturales sont observés dans l'ensemble de l'échantillon : la culture continue en mil et la rotation avec une légumineuse, principalement l'arachide. Les proportions sont variables selon la

zone. La culture continue en mil est pratiquée sur la majorité des parcelles en CC (79% dans le BAN, 66% dans le BAS et 93% en H-C). Les CC en rotation avec les légumineuses sont en faible proportion (17% dans le BAN, 34% dans le BAS et 7% en H-C). Les CB sont cultivés principalement en rotation avec les légumineuses (62% dans le BAN, 82% dans le BAS et 72% en H-C) et dans une moindre mesure en continu avec le mil (32% dans le BAN, 17% dans le BAS et 24% en H-C). Les proportions de la rotation avec le coton, la pastèque (*Citrullus lanatus* (Thunb.) Matsum. et Nakai) ou le bissap (*Hibiscus sabdariffa* L.) excèdent rarement 6% dans les villages (figure 13). Il est important de noter que les CB cultivés en continu en mil bénéficient de l'apport de fumure organique (31% dans le BAN, 73% dans le BAS et 50% en H-C). Ainsi, 6 principaux types de gestion de la fertilité, représentant 85% des parcelles de mil, se dégagent, avec des taux variables selon la zone (figure 13). Il s'agit des :

- champs de brousse fumés à précédent légumineuse (CBFL) : 19% des parcelles totales ;
- champs de brousse non fumés à précédent légumineuse (CBNL) : 23% des parcelles totales ;
- champs de brousse fumés à précédent céréale (CBFC) : 7% des parcelles totales ;
- champs de brousse non fumés à précédent céréale (CBNC) : 11% des parcelles totales;
- champs de case fumés à précédent céréale (CCFC) : 18% des parcelles totales ;
- champs de case non fumés à précédent céréale (CCNC) : 7% des parcelles totales.

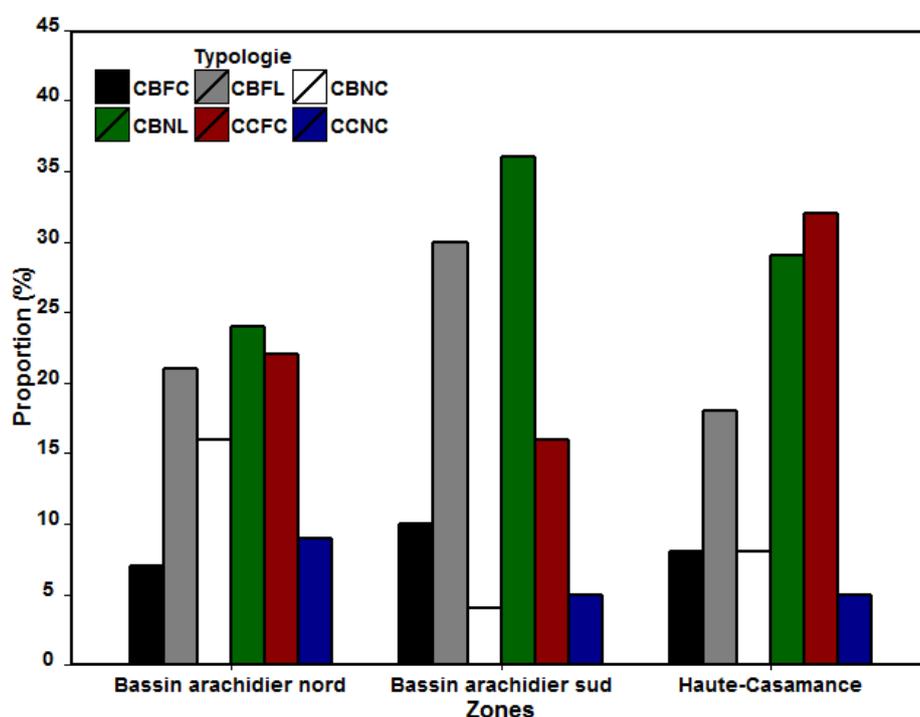


Figure 13 : Typologie des champs en lien avec la gestion de la fertilité dans les 3 zones d'étude. Les taux sont calculés par rapport à la zone

3.2.4 Présentation des modèles utilisés

3.2.4.1 Eléments communs aux 2 modèles

SARRA-H et CELSIUS conservent le principe classique d'une croissance potentielle, fonction du rayonnement et de son interception par le couvert, et d'un frein hydrique qui peut la limiter en diminuant le taux de conversion de l'énergie interceptée en biomasse. Ils fonctionnent au pas de temps journalier. Ils simulent le développement phénologique en fonction du temps thermique et disposent d'algorithmes pour la prise en compte de la sensibilité des variétés au photopériodisme.

Les 2 modèles ont le même module de bilan hydrique fondé sur l'analogie réservoir selon les bases développées dans le modèle SARRA (Affholder, 1997; Baron et Reyniers, 1999). Les processus d'évaporation du sol et de transpiration de la culture sont séparés. L'évaporation du sol est proportionnelle à l'évapotranspiration potentielle (ET₀), qui est estimée selon les recommandations de la FAO (Allen *et al.*, 1998) et à la quantité d'énergie arrivant au sol (fonction de l'interception du couvert). Elle est limitée par la fraction d'eau évaporable dans le sol (FESW) d'un réservoir de surface virtuel dont la profondeur doit être définie. La demande en eau de la plante est gérée classiquement par l'ET₀ et un coefficient cultural (K_c) qui évolue de façon dynamique en relation à l'indice de surface foliaire (LAI). La transpiration de la culture est régulée par la fraction d'eau transpirable du sol (FTSW) du réservoir sol global selon l'approche Pfactor (Allen *et al.*, 1998). Le Pfactor indique la proportion de la FTSW qui est « facilement utilisable ». La profondeur du réservoir sol (et donc la quantité d'eau disponible) varie en fonction de la progression du front racinaire. Cette dernière est fonction d'une vitesse potentielle de croissance journalière en profondeur des racines, mais elle est limitée par le front d'humectation.

3.2.4.2 Spécificités du modèle SARRA-H

L'énergie lumineuse interceptée (E_a) est convertie en biomasse en fonction d'un coefficient de conversion (E_b), modulé par un frein hydrique lié à la transpiration relative. Une fraction de la biomasse produite est allouée à la respiration de maintenance en fonction de la biomasse présente et de la température (Penning de Vries *et al.*, 1989). Le reste est attribué à l'augmentation de la biomasse totale qui est répartie entre les racines, les tiges, les feuilles puis les grains. Des relations allométriques empiriques sont utilisées pour la répartition des biomasses entre les parties aériennes et souterraines, puis entre les tiges et les feuilles pour la biomasse aérienne (Samba *et al.*, 2001). Le LAI est déduit de la biomasse des feuilles en fonction de la surface foliaire spécifique (SLA) (Penning de Vries *et al.*, 1989). Il intervient dans l'interception du rayonnement selon la loi de Beer.

L'évolution du rendement est simulée en 2 étapes permettant de définir d'abord la taille du « puits » (équivalent au nombre de grains) puis le remplissage des grains. La taille du « puits-grains » correspond au rendement potentiel (RdtPot). Elle est liée à l'évolution de la biomasse aérienne durant la phase reproductive (entre l'initiation paniculaire et la floraison) selon une équation empirique comprenant 2 paramètres génétiques (KRdtA et KRdtB) qui se rapportent à l'indice potentiel de récolte (HI). Le remplissage est fonction de la production de biomasse, qui est sensible à la contrainte hydrique, et de mécanismes de réallocation depuis les feuilles. Cela gère la sénescence des feuilles et se traduit par une diminution de la biomasse verte et du LAI (Sultan *et al.*, 2005b). La contrainte hydrique est traduite par l'indice de satisfaction hydrique de la plante (Tr/TrPot).

$$BiomasseTotale = 0,5 * RG * (1 - LTR) * \epsilon_b * 10 * \left(\frac{Tr}{TrPot} \right) - RespMaint \quad (9)$$

où RG = radiation solaire en MJ.m⁻².j⁻¹, LTR = fraction de radiation non-interceptée par le couvert, Tr/Trpot = niveau de stress hydrique physiologique, ϵ_b = efficacité de conversion de la radiation interceptée en g.MJ⁻¹.j⁻¹, RespMaint = respiration de maintenance en g CO₂.g⁻¹ de MS.j⁻¹.

$$RdtPot = KRdtA * (BiomTotaleStadeFloraison - BiomTotaleStadeIP) + KRdtB \quad (10)$$

3.2.4.3 Spécificités du modèle CELSIUS

Les composantes de CELSIUS qui simulent la croissance et le développement sont adaptées du modèle « Simulateur mulTIdisciplinaire pour les Cultures Standard » (STICS) (Brisson *et al.*, 1998, 2003). Le LAI est calculé en fonction du temps thermique (Hu) et d'un paramètre de croissance maximale journalière du LAI en l'absence de tout stress (DLAImax) à caler pour le cultivar et la densité de peuplement simulés. La croissance journalière de la biomasse (GRO) est une fonction du rayonnement intercepté photosynthétiquement actif (RAINT), de la température journalière moyenne et du coefficient de conversion du rayonnement maximal (ϵ_{bmax}).

$$GRO = (\epsilon_{bmax} * RAIN - 0,0815 * RAIN^2) * F(T) \quad (11)$$

où F(T) est une fonction parabolique de la température dépendant de paramètres spécifiques à l'espèce TCmin, TCopt et TCmax, respectivement les températures minimale, optimale et maximale pour l'efficacité de conversion du rayonnement en biomasse.

Le rendement en grain est calculé selon 2 approches simples couplant un indice de récolte à une limitation par les « puits » (Brisson *et al.*, 1998). L'indice de récolte, qui est fonction de la durée de la période de remplissage des grains, est calculé à partir d'un taux de croît journalier et d'un indice

de récolte maximal, spécifiques à l'espèce. Un premier rendement en grain est calculé comme étant le produit de l'indice de récolte et de la biomasse totale. Un deuxième rendement en grain est calculé comme étant le produit du poids maximal d'un grain (spécifique à l'espèce) et de la valeur simulée du nombre de grains produits par unité de surface (Ngrain). Ngrain est une fonction linéaire de la vitesse de croissance moyennée sur la durée du stade de floraison (VitMoy) :

$$N_{grain} = C_{grain} * VitMoy + C_{grainv0} \quad (12)$$

Cgrain correspond au nombre de grains mis en place par gramme de matière sèche par jour et Cgrainv0 est la valeur que cette variable prend quand la vitesse de croissance est nulle. Ces 2 paramètres sont spécifiques au cultivar.

Au final, le rendement en grain correspond à la valeur minimale entre les 2 valeurs calculées par le modèle (Affholder *et al.*, 2013; Poeydebat *et al.* 2013).

3.2.5 Calage et validation du modèle SARRA-H

Pour le calage de la phénologie, les paramétrages effectués pour les 3 variétés au chapitre 2 ont été utilisés. Pour la croissance, SARRA-H a été calé sur les 3 variétés dans le cadre du projet AMMA à l'aide d'expérimentations conduites au Sénégal lors de l'hivernage 2008 (Kouakou, 2009; Muller *et al.*, 2009). L'option a été faite au cours de la présente étude d'utiliser le modèle ainsi calé et de ne procéder qu'à une validation. La validation a porté sur le rendement en grain et a été effectuée avec des données provenant d'essais conduits d'une part sur le Souna de 1996 à 1999 (Diouf, 2000) et en 2007 (Siéné *et al.*, 2010b), et d'autre part sur le Sanio en 2012. Ces essais ont été conduits sur le site du Centre National de Recherches Agronomiques (CNRA) de Bambey en conditions d'alimentation hydrique diverses et avec les doses d'engrais recommandées par l'ISRA.

Pour évaluer la performance du modèle, une combinaison de représentations graphiques et de mesures statistiques a été utilisée. Les paramètres statistiques retenus sont la valeur de la racine de l'erreur quadratique moyenne relative (RRMSE) et l'indice d'agrément (IA) (Willmott, 1982). La RRMSE est exprimée en pourcentage (%) et l'IA est exprimé en valeur relative. Un modèle ayant une bonne performance a des valeurs de RRMSE et d'IA qui tendent respectivement vers 0 et 1.

$$RRMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \quad (7)$$

$$IA = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{P}|)^2} \quad (13)$$

où P_i = valeur prédite, O_i = valeur observée, n = nombre de cas considérés, \bar{P} = moyenne des valeurs prédites, \bar{O} = moyenne des valeurs observées.

3.2.6 Calage et validation du modèle CELSIUS

Le paramétrage du modèle CELSIUS a reposé principalement sur la méthodologie utilisée par Affholder *et al.* (2013) dans son étude sur l'analyse des écarts de rendement dans le bassin arachidier. Les paramètres du modèle comprennent d'une part des paramètres pour lesquels des valeurs pouvaient être fixées grâce à la littérature, et d'autre part des paramètres à caler à partir des données des réseaux de parcelles d'agriculteurs.

Presque tous les paramètres obtenus par Affholder *et al.* (2013) pour le Souna dans les mêmes conditions de culture, et qui sont spécifiques à l'espèce mil ont été conservés durant cette étude. Le calage ici n'a porté que sur la phénologie du Sanio, sur les paramètres Cgrain et CgrainV0 qui sont liés au cultivar et sur le taux d'augmentation journalière de l'indice de récolte (Viticarb) du Souna et du Sanio.

Le paramétrage de la phénologie du Sanio a consisté à déterminer les valeurs d'un coefficient photopériodique empirique (SensiPhot) et de la photopériode critique (MOPP) qui permettent de faire coïncider les dates de floraison observées à celles qui sont simulées. Les données des essais de suivi de la phénologie du Sanio de Séfa à Kolda (cf. chapitre 2) ont été utilisées pour cela. Le module phénologique a été validé à l'aide des données des essais de suivi de la phénologie du Sanio de Séfa à Bambey (latitude =14,71°N) et à Ndiol (latitude =16,14°N) (cf. chapitre 2).

Affholder *et al.* (2013) ont déterminé les paramètres Cgrain et CgrainV0 du Souna lors de leur étude, mais uniquement à partir des données de la base ESPACE. Dans le cadre de notre étude, ces paramètres ont été déterminés à l'aide de l'ensemble des données des 3 périodes (ESPACE, AMMA, PPAAO). La méthode de calage a consisté pour chaque cultivar à ajuster le nombre de grains simulé à la courbe enveloppe du nuage de points obtenus à partir du nombre de grains observé en fonction de VitMoy. En utilisant la procédure de la courbe enveloppe, nous assumons que dans les parcelles définissant la courbe enveloppe, le nombre de grains est déterminé uniquement par la température, la radiation, le stress hydrique et les caractéristiques du cultivar. La valeur du paramètre Viticarb a été obtenue par ajustement. Les données des parcelles suivies à Dioulacolon ont été utilisées pour construire la courbe enveloppe pour le Sanio et le reste des données pour le Souna et le Thialack.

3.2.7 Simulation des cultures paysannes et analyse de données

Les données journalières de pluie (tableau IV) proviennent de pluviomètres manuels installés dans chaque village. Les données climatiques du BAN proviennent de Bambey, celles du BAS de Nioro et celles de la H-C de Kolda, qui sont les stations synoptiques les plus proches. Par soucis de simplification, la densité moyenne de chaque zone (12 300 poquets.ha⁻¹ pour le BAN, 25 000 poquets.ha⁻¹ pour le BAS et 40 000 poquets.ha⁻¹ pour la H-C) a été retenue pour CELSIUS. La densité recommandée par l'ISRA (12 300 poquets.ha⁻¹) a été retenue pour SARRA-H, car ce dernier est quasi-insensible à la densité de semis. Les valeurs utilisées pour les réserves utiles des sols sont de 90 mm (*Dior*), 110 mm (*Deck-dior*) et 120 mm (*Deck*) (Hamon, 1980; Imbernon, 1981).

Deux options de simulations ont été choisies. Dans la première option, les simulations sont effectuées en considérant des « conditions moyennes », c'est-à-dire en considérant le village comme un seul point de simulation : pour cela la date de semis majoritaire et le sol dominant sont utilisés. Cette option a concerné 41 « villages-années ». Dans la seconde option, les simulations sont faites pour chacune des parcelles individuellement, avec les dates de semis et les types de sols observés. Elle a porté sur 1001 parcelles sur les 1071 de la base de données. En effet, 70 parcelles ne présentant pas de données de rendement parce qu'ayant été récoltées sans contrôle par l'agriculteur ou qu'il y avait beaucoup d'incertitudes sur la date de semis, ont été écartées.

Les modèles donnent accès aux rendements potentiels (Y_p) permis par le rayonnement, la température et le génotype en absence de contrainte hydrique, et aux rendements atteignables, dits aussi rendements limités par l'eau (Y_w) en absence de toutes autres contraintes qu'une éventuelle contrainte hydrique (Evans, 1993; Penning de Vries et Rabbinge, 1995; Lobell *et al.*, 2009). Ces informations permettront de distinguer d'une part les différences de rendement dues aux différences de conditions climatiques entre années et sites, et d'autre part les différences dues à d'autres facteurs que le climat.

L'analyse des rendements et de leur variabilité a été faite à partir des Y_{obs} , Y_w et des écarts de rendement ($Y_{wg} = Y_w - Y_{obs}$ et $Y_{pg} = Y_p - Y_w$). Pour les analyses statistiques, des outils descriptifs (moyennes, quantiles) et graphiques (histogrammes, boîtes à moustache), ainsi que des analyses de variances (ANOVA) suivies de tests de Tukey en cas de besoin, ont été effectués au seuil de 5% à l'aide du logiciel statistique R version 3.0.1 (R Development Core Team, 2013).

3.3 Résultats

3.3.1 Validation du modèle SARRA-H sur le rendement en grain

Les traitements hydriques qui ont servi à la validation de SARRA-H sont au nombre de 14 pour le Souna et de 5 pour le Sanio. Les données ont été collectées lors d'essais en conditions d'hivernage (Hi) et de contre-saison (Cs). Il s'agit principalement de traitement d'irrigation à évapotranspiration maximale (ETM), de pluvial strict (PLU), de pluvial avec de l'irrigation de complément aux stades épiaison (IrrEPI), remplissage des grains (IrrREG) ou tallage (IrrTAL) et des stress à différents stades (STR) ou à des stades précis du cycle (remplissage des grains = StrREG et stade végétatif = StrVEG). Le modèle reproduit de façon satisfaisante les rendements du Souna (IA=0,76 et RRMSE=36%) (figure 14A) et du Sanio (IA=0,63 et RRMSE=19%) (figure 14B). Il peut donc être utilisé pour la simulation des rendements de ces 2 variétés dans les conditions de l'étude.

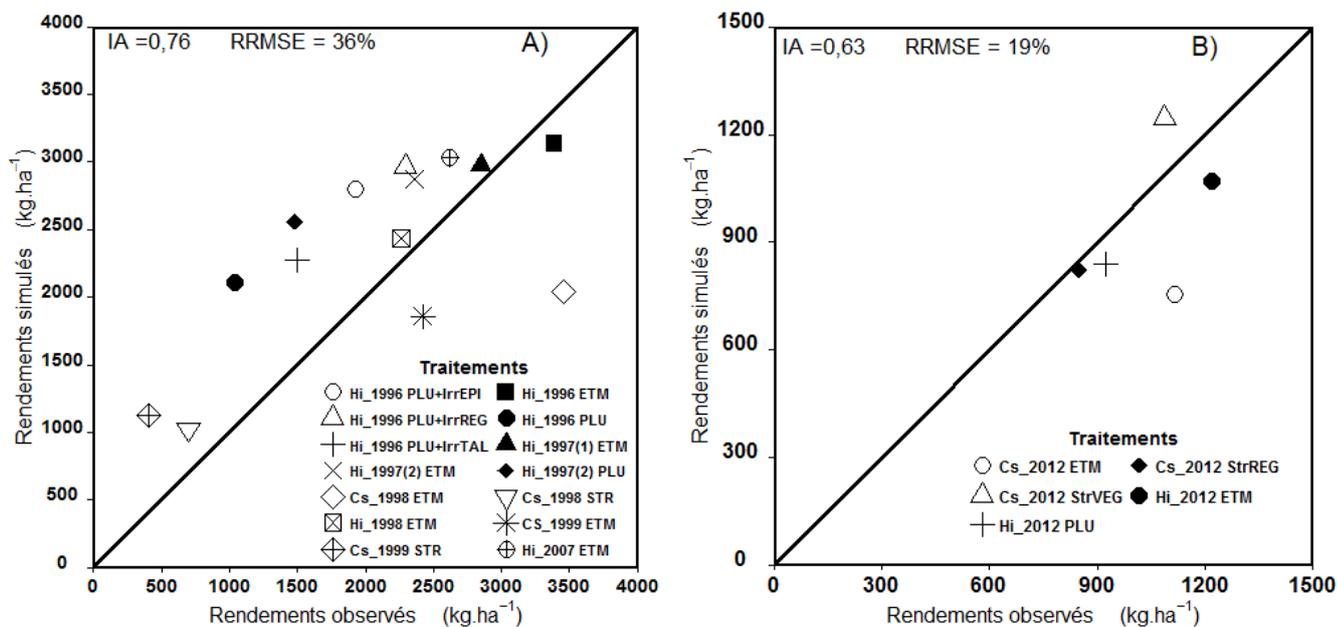


Figure 14 : Résultats de la validation du modèle SARRA-H sur le Souna (A) et sur le Sanio (B) pour le rendement en grain

3.3.2 Calage et validation du modèle CELSIUS

Pour la phénologie du Sanio, les valeurs de SensiPhot et de MOPP ayant permis un bon calage du cycle de la culture avec CELSIUS sont respectivement de 0,68 et de 12 heures. La validation du développement phénologique à des latitudes différentes, et ce à 3 différentes dates de semis, a été satisfaisante (IA=0,93 et RRMSE=10%) (figure 15A).

Pour le rendement en grain, les valeurs de C_{grain} et de C_{grainV0} sont respectivement de 1846 et de 3266 g MS.j^{-1} pour le Souna (figure 15B) et de 2103 et 633 g MS.j^{-1} pour le Sanio (figure 15C). Le taux d'augmentation journalière de l'indice de récolte a été fixé à 0,005 $\text{g grain.g MS}^{-1}.\text{j}^{-1}$.

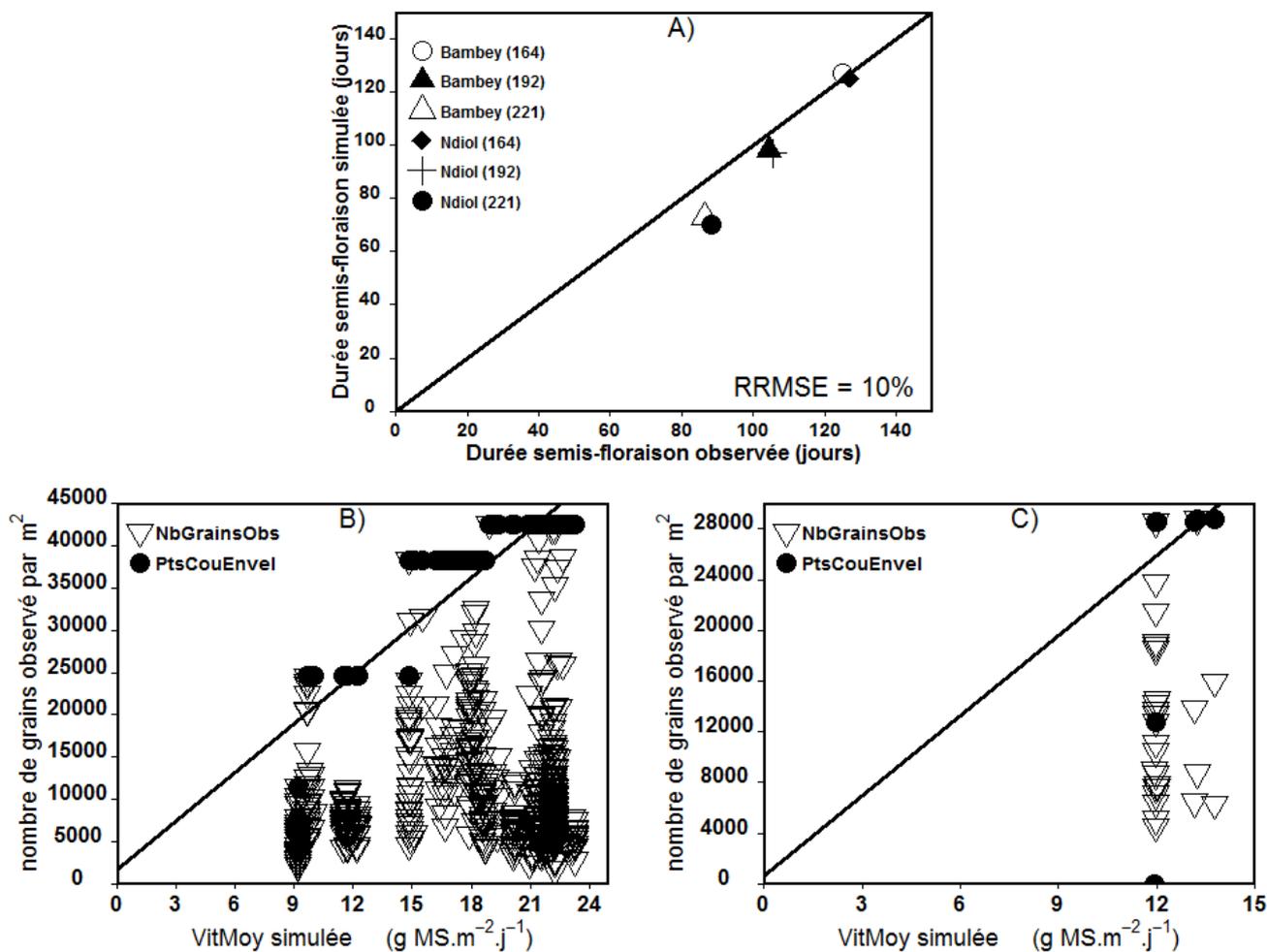


Figure 15 : Résultats de la validation de la phénologie de CELSIUS (A) et courbes enveloppes permettant de déterminer les paramètres C_{grain} et C_{grainV0} du Souna (B) et du Sanio (C). Les chiffres entre parenthèses sur la figure A représentent les dates de semis en jours juliens. (NbGrainsObs = nombre de grains observé et PtsCouEnvel = Points de la courbe enveloppe).

3.3.3 Application à la prévision des rendements des agriculteurs

Les résultats des simulations faites avec les « conditions moyennes » ($Y_{wPrév}$) des villages-années sont quasiment identiques aux rendements moyens des villages-années calculés à partir des simulations des parcelles individuellement (Y_{wMoy}). Les écarts entre les rendements moyens obtenus par simulations et les rendements moyens observés sont très importants. Les valeurs de RRMSE et d'IA, respectivement de 260% et 0,26 pour Y_{wMoy} et de 284% et 0,22 pour $Y_{Prév}$, sont très éloignées de celles permettant d'assumer d'une bonne performance de SARRA-H pour la

détermination des rendements paysans (figure 16A). Les résultats obtenus avec CELSIUS (figure 16B) sont certes meilleurs, mais les écarts restent toutefois importants, avec des valeurs de RRMSE et d'IA, respectivement de 198% et 0,24 pour YwMoy et de 200% et 0,23 pour YPrév. A noter que lorsque les rendements simulés sont faibles (moins de 1000 kg.ha⁻¹), en principe pour les villages-années où la contrainte hydrique est importante, la qualité du modèle SARRA-H est bien meilleure (figure 16A).

Ainsi, l'utilisation de la moyenne des parcelles simulées individuellement ne permet pas d'améliorer les résultats de prévision par rapport à la méthode opérationnelle traditionnelle qui consiste à utiliser les « conditions moyennes ». Des écarts importants existent entre rendements simulés et rendements des agriculteurs, qui sont dus à des facteurs autres qu'hydriques et qu'il conviendrait de déterminer à travers l'analyse d'écarts de rendement.

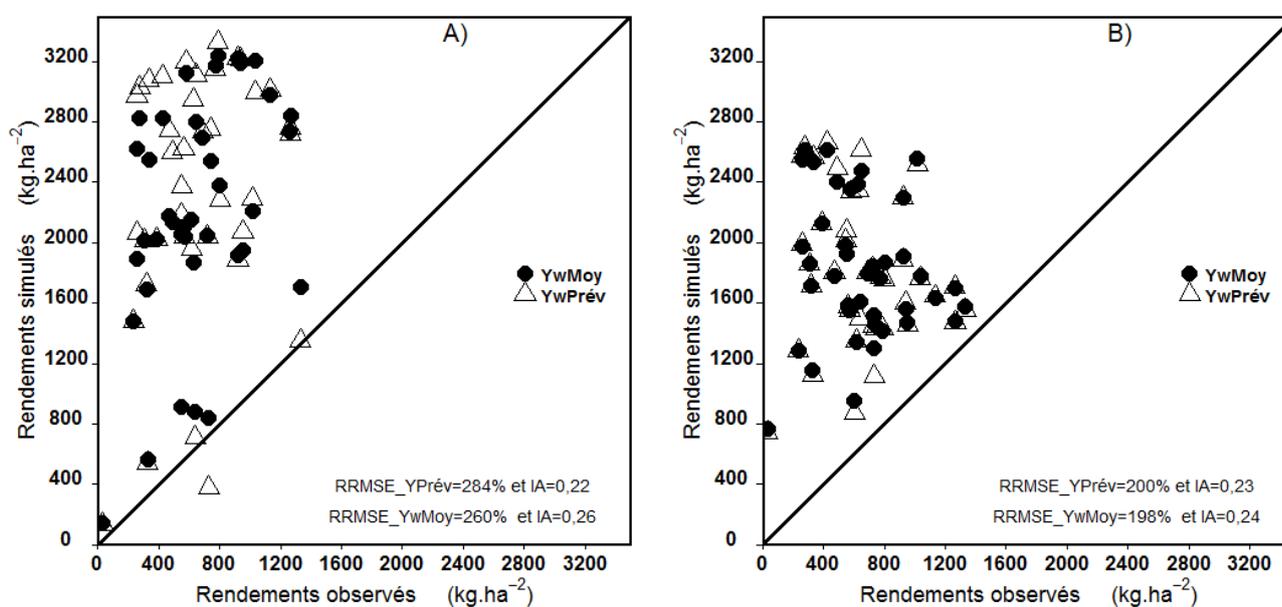


Figure 16 : Comparaison, à l'aide des modèles SARRA-H (A) et CELSIUS (B), des rendements moyens obtenus avec les résultats des simulations en considérant des « conditions moyennes » (YPrév), et de ceux obtenus en considérant les parcelles individuellement (YwMoy) avec les rendements des agriculteurs des villages-années

3.3.4 Analyse de la variabilité des rendements mesurés dans les parcelles d'agriculteurs

Les rendements moyens des agriculteurs (Yobs) et la distribution de leur variabilité diffèrent fortement en fonction des villages-années. Dans le BAN, les rendements des villages-années sont compris entre 31 ± 14 kg.ha⁻¹ (Keur Boumi 1990) et 1015 ± 157 kg.ha⁻¹ (Bambey Sérère 2012) avec des médianes variant de 14 à 1006 kg.ha⁻¹. Dans le BAS et la H-C, les rendements et leurs médianes

sont plus élevés. Les moyennes varient de $615 \pm 160 \text{ kg.ha}^{-1}$ (Dioulacolon 2011) à $1330 \pm 218 \text{ kg.ha}^{-1}$ (Ndimb Taba 1991) et les médianes de 575 à 1253 kg.ha^{-1} (figure 17). La plupart des rendements des parcelles (91% dans le BAN et 61% dans le BAS + H-C) ont un rendement de moins d'1 tonne. ha^{-1} . Dans le BAN, 57% des parcelles ont même moins de 500 kg.ha^{-1} .

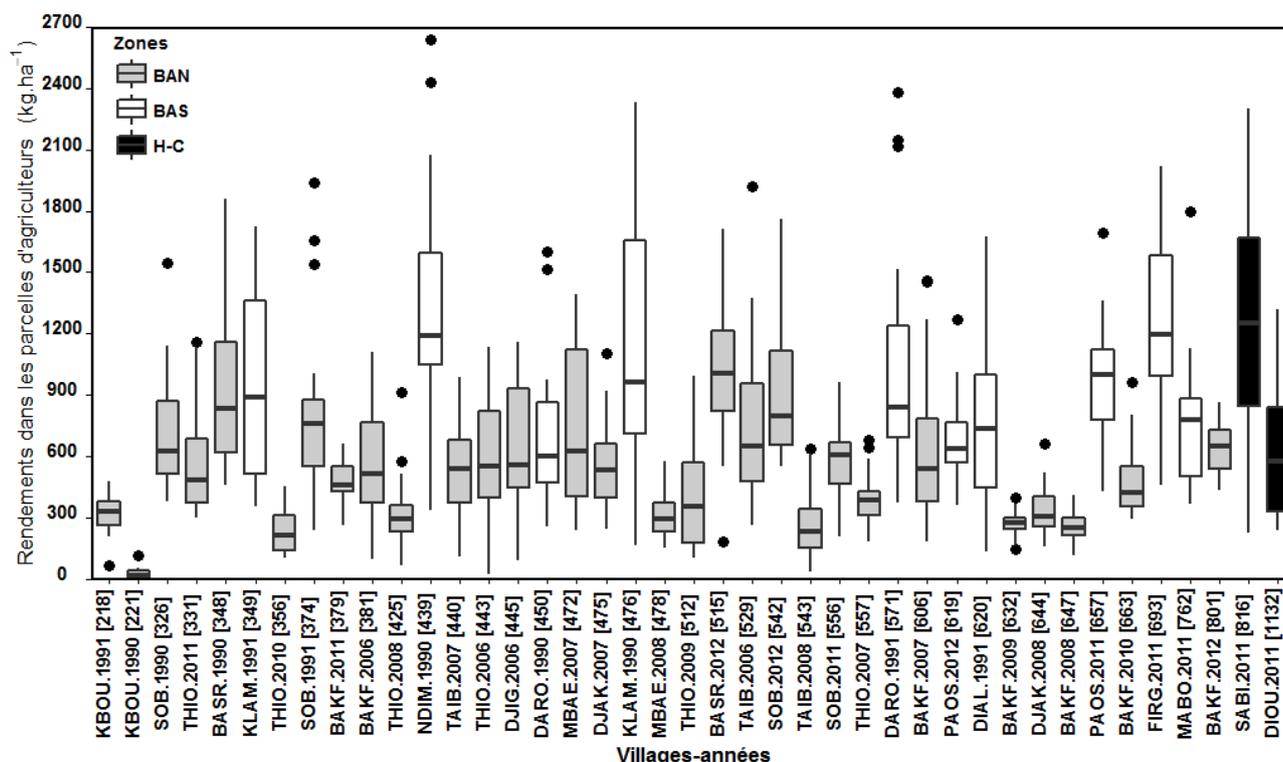


Figure 17 : Variabilité des rendements dans les parcelles des agriculteurs en fonction des villages-années. Les nombres entre les crochets représentent les pluviométries annuelles

La distribution des rendements des agriculteurs a une allure normale. Les rendements maxima sont obtenus avec des pluviométries se situant autour de 450 mm pour le BAN et de 600 mm pour le BAS + H-C. Pour des pluviométries supérieures à ces seuils, les rendements deviennent de plus en plus faibles. Par ailleurs, à pluviométrie équivalente, les villages de la période 1990-1991 ont des rendements meilleurs que ceux de la période 2006-2012. Les meilleurs rendements des agriculteurs (percentile 90) sont, dans 64% des villages du BAN, supérieurs à 500 kg.ha^{-1} , avec près de 30% des villages qui ont un percentile 90 supérieur à 1 tonne.ha^{-1} . Dans le BAS + H-C, ils sont plus élevés (plus de 1000 kg.ha^{-1}), avec également près de 30% des villages qui ont un percentile 90 supérieur à 2 tonnes.ha^{-1} .

L'analyse de variances du rendement en fonction de la typologie établie révèle que les rendements obtenus sur les champs fumés ($\text{CCFC} = 761 \pm 74 \text{ kg.ha}^{-1}$, $\text{CBFC} = 750 \pm 127 \text{ kg.ha}^{-1}$ et $\text{CBFL} = 694 \pm 200 \text{ kg.ha}^{-1}$) sont significativement plus élevés ($p < 0,05$) que ceux obtenus sur les champs non

fumés (CBNL = $526 \pm 45 \text{ kg.ha}^{-1}$ et CBNC = $425 \pm 52 \text{ kg.ha}^{-1}$). Toutefois, le test n'a pu distinguer le rendement des parcelles de CCNC ($607 \pm 103 \text{ kg.ha}^{-1}$) des autres traitements (figure 18). Ainsi, Yobs varie fortement avec le niveau de fertilité des parcelles.

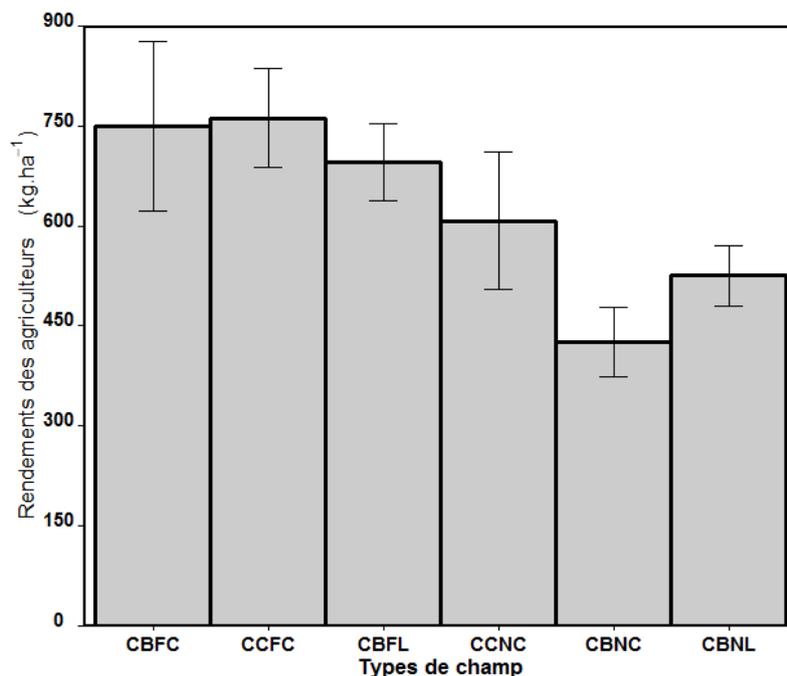


Figure 18 : Rendements moyens des agriculteurs en fonction de la typologie établie. Les barres d'erreurs représentent les valeurs d'intervalles de confiance calculées au seuil de 5%

3.3.5 Analyse des rendements simulés et des écarts de rendement

Les rendements des parcelles de 2 villages-années (Thiock Niang 2006 et Mbaena Wolof 2007), soit 68 parcelles, n'ont pu être simulés correctement avec SARRA-H. En effet, de longues périodes sans pluie ont succédé à la levée. Le modèle simule donc la mort des plants alors qu'en réalité ils ont survécu. L'analyse avec le modèle SARRA-H ne portera donc que sur 933 parcelles.

Les écarts de rendement (Y_{pg}), représentant la part de la pluviométrie dans la limitation du rendement, diminuent du nord au sud (figure 19). Ces écarts représentent respectivement 28%, 18% et 3% du rendement potentiel respectivement dans le BAN, le BAS et la H-C selon SARRA-H. Les résultats de CELSIUS donnent des taux de 27%, 10% et 1% pour les mêmes zones. L'effet de la contrainte hydrique devient donc plus important en partant du sud au nord.

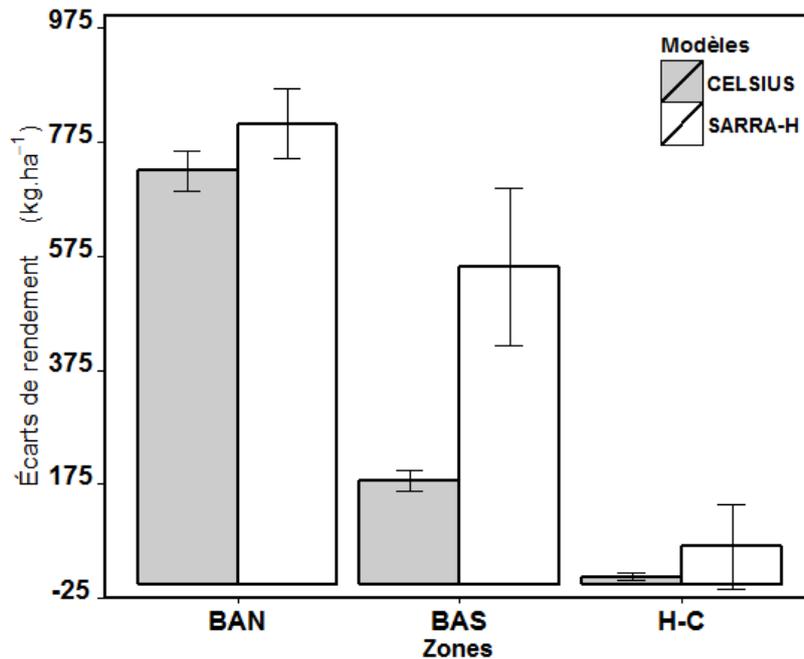


Figure 19 : Écarts de rendement entre rendements potentiels (Y_p) et rendements limités par l'eau (Y_w) pour les simulations avec SARRA-H et CELSIUS. Les barres d'erreurs représentent les valeurs d'intervalles de confiance calculées au seuil de 5%

Y_w est très variable en fonction des villages-années. Il est en général plus élevé dans les villages-années à forte pluviométrie, en particulier à la période 2006-2012. Dans le BAN, la moyenne de Y_w des villages-années varient de 142 à 3220 kg.ha^{-1} selon SARRA-H et de 765 à 2617 kg.ha^{-1} selon CELSIUS. Dans le BAS + H-C, ils varient de 842 à 3239 kg.ha^{-1} selon SARRA-H et de 1345 à 1795 kg.ha^{-1} selon CELSIUS. Par ailleurs, la variabilité entre parcelles au sein du village-année est faible pour des pluviométries élevées (figure 20).

Les rendements limités par l'eau sont très élevés par rapport aux rendements des agriculteurs. Ce qui donne des écarts de rendement (Y_{wg}) importants (figure 21). Dans le BAN, Y_{wg} varie de $111 \pm 16 \text{ kg.ha}^{-1}$ (Keur Boumi 1990) à $2550 \pm 147 \text{ kg.ha}^{-1}$ (Backfassagal 2009), avec des médianes allant de -184 à 2730 kg.ha^{-1} . Dans le BAS + H-C, Y_{wg} varient de $111 \pm 89 \text{ kg.ha}^{-1}$ (Darou Khoudoss 1990) à $2449 \pm 190 \text{ kg.ha}^{-1}$ (Mabo 2011) avec des médianes allant de -33 à 2520 kg.ha^{-1} . Plus de 81% (BAN) et de 75% (BAS + H-C) selon SARRA-H ou de 89% (BAN) et de 83% (BAS + H-C) selon CELSIUS des villages-années ont un écart de plus d'1 tonne. ha^{-1} .

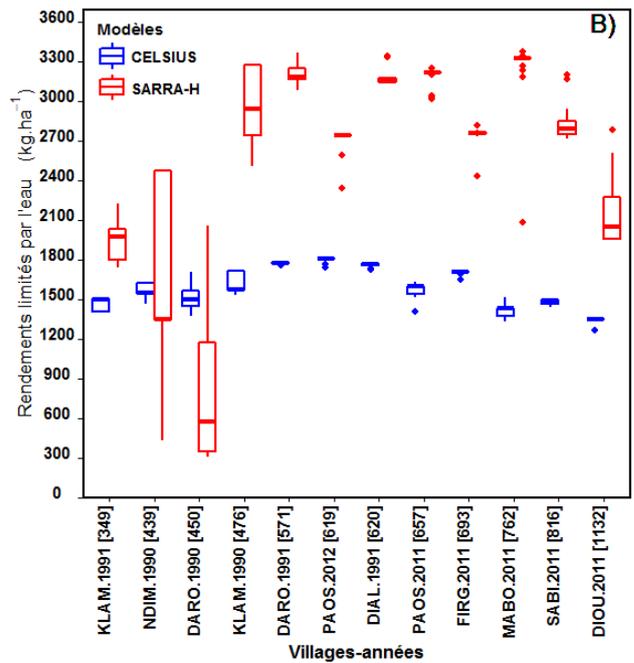
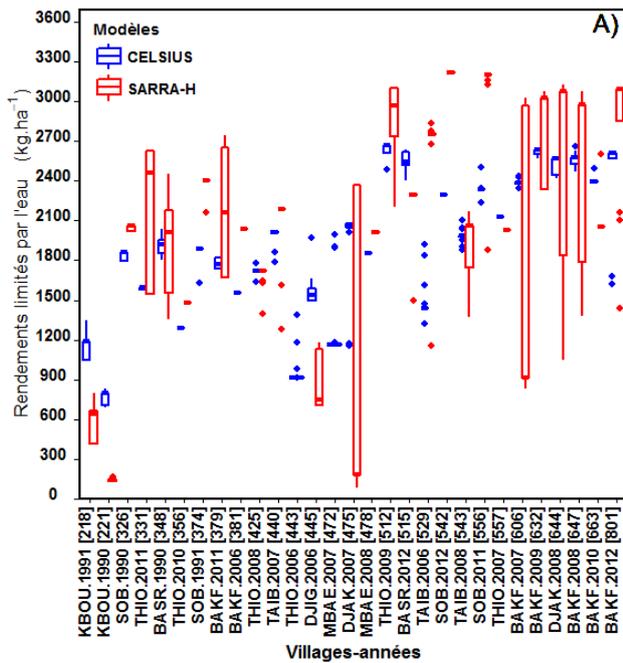


Figure 20 : Variabilité des rendements limités par l'eau simulés avec SARRA-H et CELSIUS en fonction des villages-années dans le BAN (A) et le BAS + H-C (B). Les nombres entre les crochets représentent les pluviométries annuelles

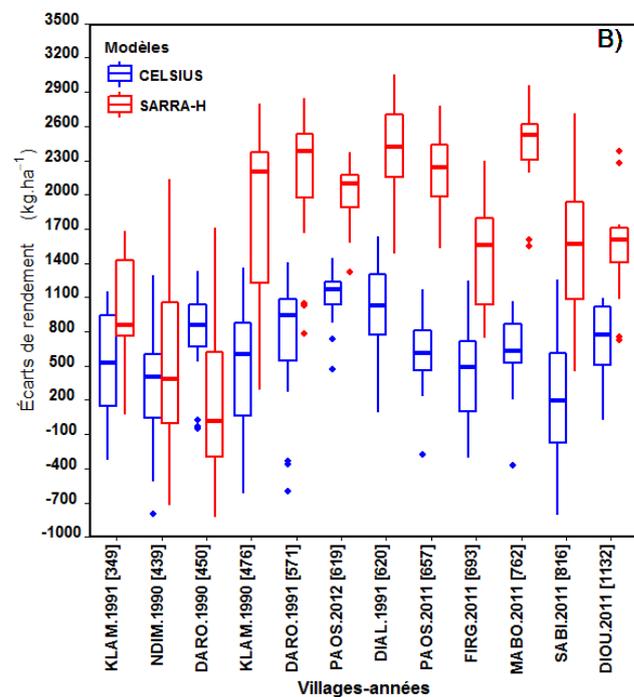
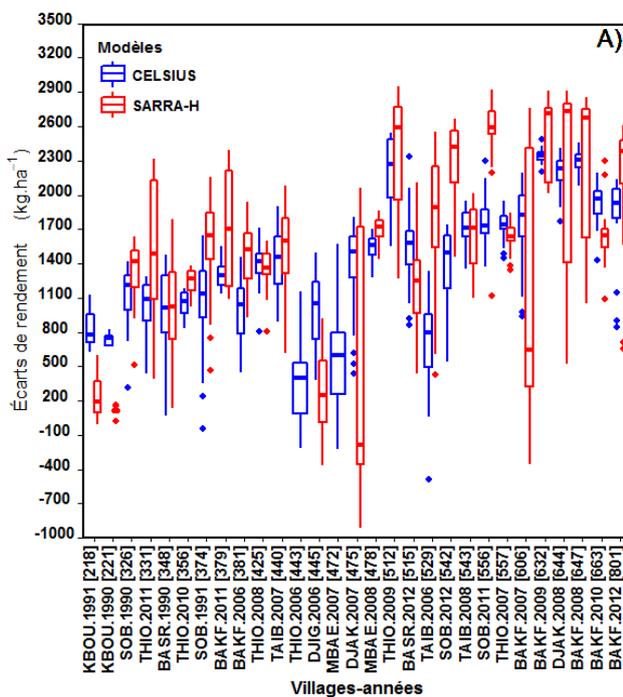


Figure 21 : Variabilité des écarts de rendement (Y_{wg}) obtenus avec les simulations avec SARRA-H et CELSIUS en fonction des villages-années dans le BAN (A) et le BAS + H-C (B). Les nombres entre les crochets représentent les pluviométries annuelles

Dans l'ensemble, les écarts de rendement des villages-années augmentent avec le niveau des pluies, jusqu'à des pluviométries de 650 mm. Au-delà de cette quantité, Ywg diminue lorsque la pluie augmente. Pour CELSIUS, la baisse de Ywg dans le BAS + H-C commence à partir d'une valeur plus faible de pluie (476 mm).

Les écarts de rendement varient avec le niveau de fertilité des parcelles. En fonction de la zone, la variabilité des moyennes des rendements des types de champ est différente. Elle est plus forte dans les zones humides (BAS + H-C), où selon la typologie établie Ywg passe de 1015 à 1769 kg.ha⁻¹ selon SARRA-H et de 162 à 864 kg.ha⁻¹ selon CELSIUS (figure 22).

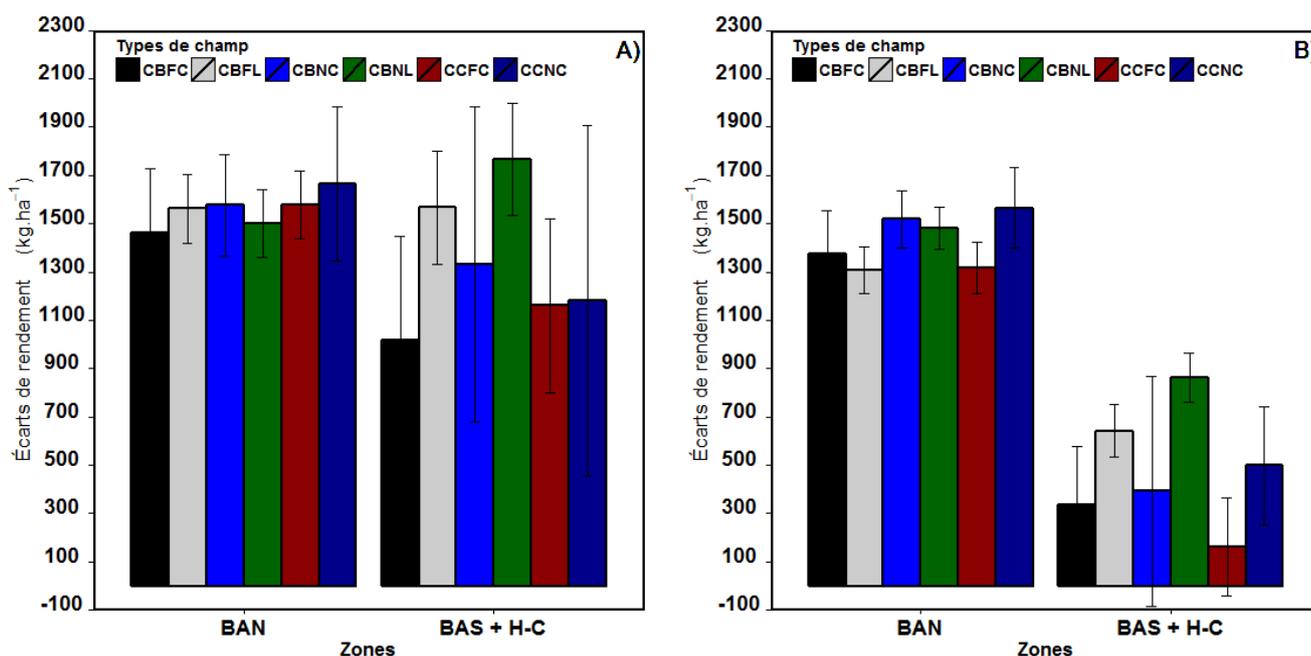


Figure 22 : Moyenne des écarts de rendement obtenus avec les simulations de SARRA-H (A) et CELSIUS (B) en fonction de la typologie établie. Les barres d'erreurs représentent les valeurs d'intervalles de confiance calculées au seuil de 5%

La comparaison entre parcelles d'agriculteurs et sous-parcelles fertilisées montrent que Ywg est plus faible sur les sous-parcelles fertilisées sauf à Backfassagal 2012 (figure 23). La baisse de Ywg entre parcelles d'agriculteurs et sous-parcelles fertilisées varie de 7 à 62% quel que soit le modèle utilisé. Cependant avec SARRA-H, il n'y a qu'à Sob 2012 que la baisse est significative ($p < 0,05$). Les résultats avec CELSIUS montrent en plus des différences significative ($p < 0,05$) pour Backfassagal 2011, Mabo 2011, Paoskoto 2012 et Thiock Niang 2011. L'augmentation de l'écart de rendement avec l'engrais à Backfassagal en 2008 de près de 5% n'est pas significative quel que soit le modèle.

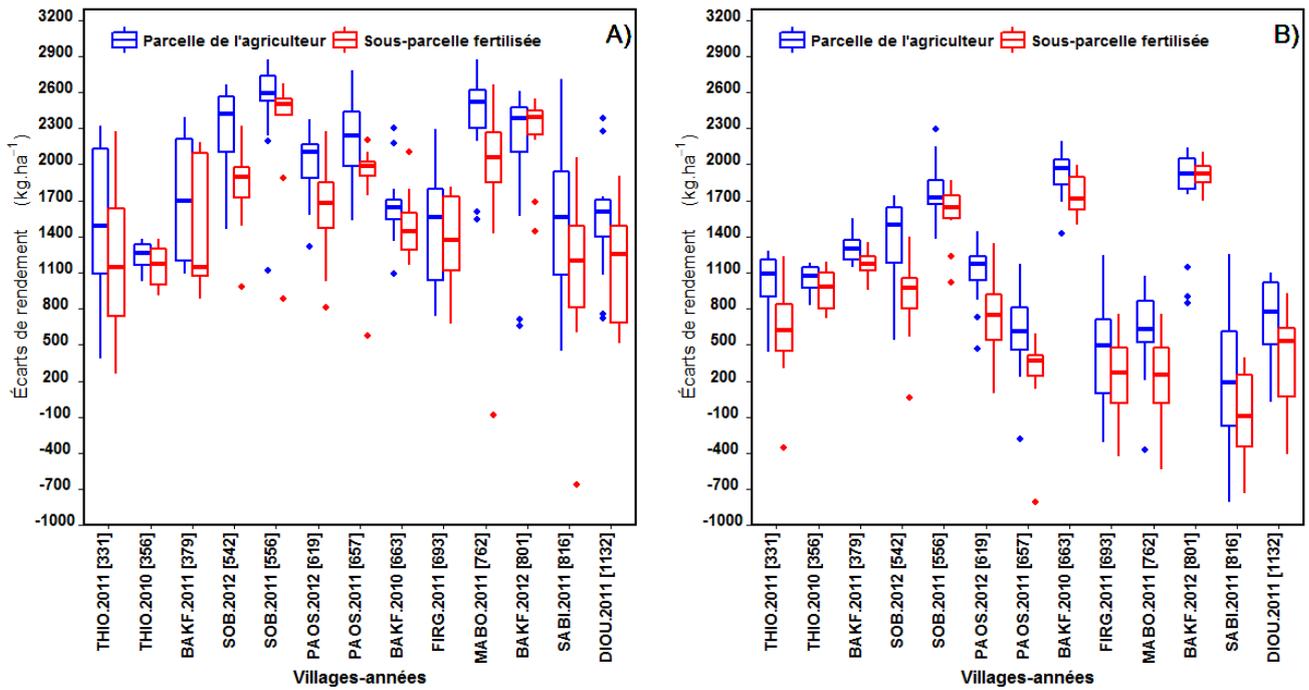


Figure 23 : Comparaison entre parcelles d'agriculteurs et sous-parcelles fertilisées des écarts de rendement obtenus avec les simulations de SARRA-H (A) et CELSIUS (B). Les nombres entre les crochets représentent les pluviométries annuelles

Par ailleurs, les écarts de rendement dans chacune des zones augmentent avec le temps (figure 24). Dans le BAN, Ywg passe de $915 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ (1990-1991) à $1642 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ (2006-2012) selon SARRA-H et de $964 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ (1990-1991) à $1467 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ (2006-2012) selon CELSIUS. La différence de moyenne entre périodes est significative ($p < 0,05$). Dans le BAS + H-C, Ywg passe de $616 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ (1990-1991) à $630 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ (2006-2012) selon SARRA-H et de $1254 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ (1990-1991) à $1913 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ (2006-2012) selon CELSIUS. La différence n'est pas significative selon SARRA-H. Cette hausse de Ywg suggère une baisse de la productivité du mil dans les zones d'étude entre les 2 périodes.

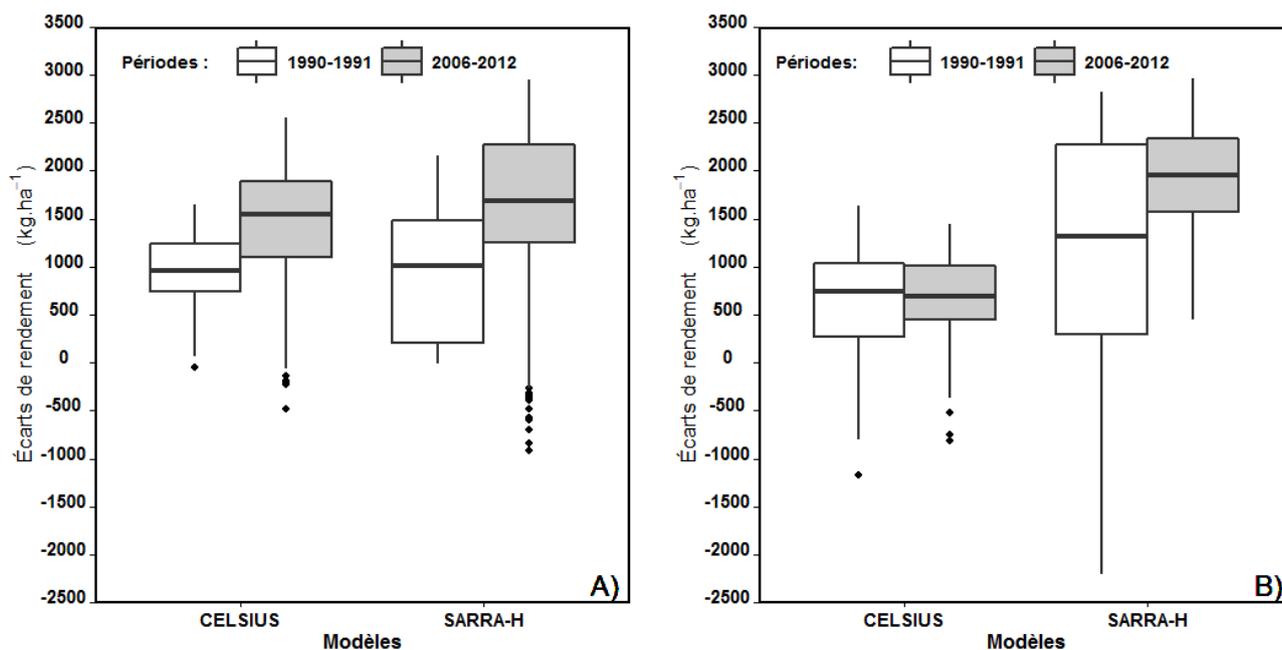


Figure 24 : Comparaison de la variabilité des écarts de rendement entre périodes dans le BAN (A) et le BAS+H-C (B)

3.3.6 Analyse de sensibilité sur le coefficient de conversion de l'énergie en biomasse

Le faible niveau de fertilité des parcelles en milieu paysan est un facteur important dans la limitation des rendements du mil. Pour faire donc des simulations qui reflètent les conditions paysannes, nous avons fait l'option de baisser le coefficient de conversion de l'énergie en biomasse, qui par défaut peut être utilisé pour représenter le niveau de fertilité. Sa valeur de calage est de 4,4 g.MJ⁻¹ pour SARRA-H et de 3,4 g.MJ⁻¹ pour CELSIUS.

De l'analyse de sensibilité qui a été effectuée sur ce coefficient, il ressort que la valeur qui permet d'estimer correctement la valeur moyenne des rendements de l'ensemble des villages-années est de 2,8 g.MJ⁻¹ pour SARRA-H (RRMSE = 71% et IA = 0,42) (figure 25A) et de 1,5 g.MJ⁻¹ pour CELSIUS (RRMSE = 50% et IA = 0,32) (figure 25C). L'analyse par zone révèle que la valeur de ce coefficient pour SARRA-H est valable dans les 2 zones (BAN et BAS+H-C). Pour CELSIUS au contraire, la valeur du coefficient dépend de la zone. Les valeurs qui permettent de bonnes prévisions dans le BAN et le BAS+H-C sont respectivement de 1,3 g.MJ⁻¹ (RRMSE = 46% et IA = 0,45) et de 2,2 g.MJ⁻¹ (RRMSE = 28% et IA = 0,24).

Cependant l'usage d'une valeur unique de ce coefficient introduit des erreurs systématiques sur certaines années. Pour SARRA-H, si l'on utilise la valeur 2,8 g.MJ⁻¹ les rendements sont systématiquement surestimés durant les années à forte pluviométrie. Durant les années à faible

pluviométrie, la prévision est par contre meilleure (figure 25B). Pour CELSIUS, avec la valeur moyenne de $1,5 \text{ g.MJ}^{-1}$, les rendements sont systématiquement surestimés durant les années à faible pluviométrie tandis qu'ils sont sous-estimés durant celles à forte pluviométrie dans le BAS + H-C. Dans le BAN, la tendance n'est pas nette (figure 25D).

Pour avoir de bonnes simulations par année, les valeurs de ϵ_b à utiliser pour SARRA-H devraient varier de $2,4 \text{ g.MJ}^{-1}$ pour les années humides à $3,3 \text{ g.MJ}^{-1}$ pour les années plutôt sèches. Pour CELSIUS, les valeurs de $\epsilon_{b\max}$ devraient varier de 2 à $2,3 \text{ g.MJ}^{-1}$ dans le BAS + H-C et de 1 à $1,9 \text{ g.MJ}^{-1}$ dans le BAN. Cependant, même si la baisse du coefficient de conversion de l'énergie en biomasse permet d'améliorer considérablement la valeur moyenne des rendements des villages-années, elle a pour conséquence de réduire très fortement la variabilité intra-année, inter-annuelle ou inter-village.

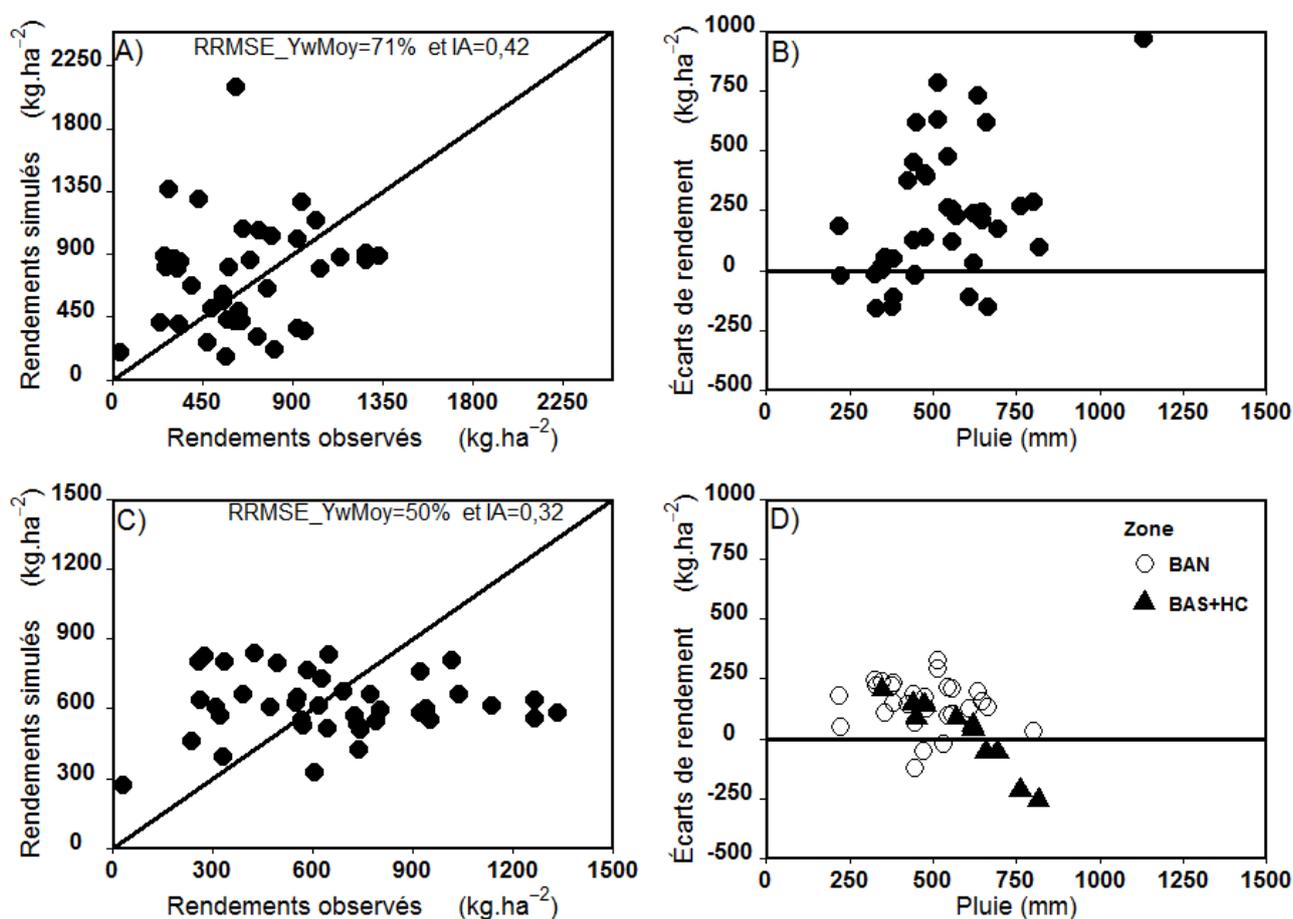


Figure 25 : Rendements des villages-années simulés avec $\epsilon_b = 2,8 \text{ g.MJ}^{-1}$ pour SARRA-H (A) et $\epsilon_{b\max} = 1,5 \text{ g.MJ}^{-1}$ pour CELSIUS (C) en fonction des rendements des agriculteurs, et écarts de rendement obtenus avec SARRA-H (B) et CELSIUS (D) en fonction des pluies

3.4 Discussion

La détermination des rendements de référence (rendements potentiels et rendements limités par l'eau) a été faite à l'aide de modèles de culture. L'utilisation de modèles en analyse d'écart de rendement est une approche qui donne des résultats satisfaisants, en comparaison à la méthode de la courbe-enveloppe ou à celle utilisant le rendement maximum des agriculteurs comme référence, parce qu'elle élimine les effets des pratiques culturales (Affholder *et al.*, 2013; van Ittersum *et al.*, 2013). Cependant, pour une bonne estimation des rendements simulés, elle demande des données climatiques de bonne qualité, et aussi que le modèle soit bien calé sur le cultivar utilisé. Dans notre cas, les données climatiques ont été mesurées à l'aide de stations météorologiques robustes et ont été contrôlées. En outre, dans plusieurs études effectuées au Sahel, y compris au Sénégal, le modèle SARRA-H a déjà été correctement calé sur la phénologie et le rendement en grain des variétés de mil fréquemment utilisées (Sultan *et al.*, 2005; Mishra *et al.*, 2008; Traoré *et al.*, 2010). Par ailleurs, pour le calage de CELSIUS, nous avons opté pour la méthode des courbe-enveloppes, décrite par (Webb, 1972) et utilisée classiquement pour l'obtention des valeurs maximales d'une composante du rendement en fonction des compétitions entre puits d'allocation des ressources (Fleury, 1990; Affholder, 2001). En appliquant cette méthode, nous avons considéré que la limite supérieure du nuage de points, dans un graphique du nombre de grains simulé en fonction de la vitesse de croissance moyenne du grain, était définie par des situations où les facteurs hydriques, de fertilité et de rayonnement exerçaient le plus faible niveau de contrainte dans les conditions du milieu et des pratiques des agriculteurs. Malgré l'incapacité du modèle SARRA-H à simuler les rendements de 2 villages-années, en particulier parce que le stress hydrique simulé, très sévère, a conduit à la mort des plants, nous pouvons estimer que les 2 modèles ont été correctement calés pour les simulations. Il faut remarquer cependant que pour un même village-année, CELSIUS simule des rendements moins variables que SARRA-H, en raison d'une plus faible sensibilité au stress hydrique.

Les rendements limités par l'eau croissent jusqu'à un seuil de pluie de 700-800 mm, puis diminuent. Ce phénomène s'explique par la diminution du rayonnement liée aux couvertures nuageuses de plus en plus importantes. C'est ce qui explique par ailleurs que les écarts de rendement finissent par baisser lorsque les pluviométries deviennent élevées (car en parallèle les rendements des agriculteurs n'évoluent plus).

L'eau est un facteur essentiel pour l'agriculture. Cependant au Sahel, le poids limitatif de la pluie et de la capacité de stockage en eau des sols dans la détermination du rendement est secondaire (Teme *et al.*, 1996). Dans le cadre de notre étude, l'eau a été responsable d'à peine 12% (BAS + H-C) et de 25% (BAN) de réduction du rendement. Ces résultats sont similaires à ceux de Boling *et al.* (2010)

sur riz pluvial en Indonésie qui ont trouvé que la limitation de rendement due à la pluie variait de 0 à 28%. Le faible poids du facteur hydrique dans la variabilité des rendements explique que malgré la prise en compte de ce facteur par SARRA-H et CELSIUS, les résultats de la prévision des rendements n'ont pas été satisfaisants.

D'autres facteurs non pris en compte par les modèles SARRA-H et CELSIUS contribuent donc à la limitation des rendements du mil. Les écarts de rendement sont très variables et différent grandement selon le type de champs, montrant ainsi l'importance du facteur fertilité (figure 22) et sans doute d'autres facteurs difficiles à appréhender. En outre, il existe une différence entre les parcelles d'agriculteurs et les sous-parcelles fertilisées de la période 2010-2012, confirmant que la fertilité est un facteur de variabilité important. Ces résultats sont soutenus par ceux de plusieurs chercheurs (Affholder, 1994; Regmi *et al.*, 2002; van Ittersum *et al.*, 2003; Mueller *et al.*, 2012; Tittonell et Giller, 2013) qui identifient également la fertilité comme l'un des facteurs les plus importants qui limite le rendement des cultures. Dans des champs à niveaux de fertilité différents, Tittonell et Giller (2013) ont mesuré des rendements relatifs du maïs de l'ordre de 0,40-0,60 (champs de cases, plus fertiles) et de l'ordre de 0,10-0,20 (champs de brousse, moins fertiles) au Kenya.

Par ailleurs, la forte pression démographique dans la zone soudano-sahélienne a eu pour conséquence la saturation de l'espace agricole et donc la disparition de la jachère ou la réduction considérable des matières organiques d'origine animale. Cela oblige les agriculteurs à pratiquer la culture continue avec pour conséquence un faible niveau de restitution des sols. Cette situation entraîne une baisse continue de la fertilité des sols qui certainement explique en bonne partie la différence significative de l'écart de rendement relatif entre les périodes 1990-1991 et 2006-2012 (figure 24). Au Sénégal en particulier, les pluies intenses signalées par Salack *et al.* (2011) dans les années 2000 ont pu accentuer cette baisse de fertilité par la perte d'éléments nutritifs par lixiviation. En plus de la fertilité, des facteurs biotiques tels que les mauvaises herbes, les champignons ou insectes ont pu avoir un effet dans la réduction du rendement. Nos suivis-enquêtes ne permettent pas une analyse qui pourrait dissocier les effets des facteurs édaphiques de ceux des facteurs biotiques ou socio-économiques dans l'explication des écarts de rendement. Mais Affholder (1994) en a fait cas, en identifiant la compétition avec les mauvaises herbes comme un important facteur limitant en conditions de pluviométrie à priori satisfaisante.

L'option de faire baisser le coefficient de conversion de l'énergie en biomasse pour prendre en compte le faible niveau de fertilité des parcelles paysannes a permis d'améliorer dans l'ensemble les résultats de prévision des villages-années. En outre pour CELSIUS, cette stratégie permet de

déterminer un coefficient pour chaque zone, permettant ainsi d'améliorer encore plus les prévisions dans les 2 zones. Mais avec cette stratégie, nous assumons à tort que la réduction du potentiel de croissance liée aux conditions agronomiques (fertilité, adventices, maladies, ravageurs) s'applique avec la même intensité à tous les stades de développement de la culture et sans interaction avec les conditions hydriques. Ce qui explique la perte de la variabilité aux différentes échelles spatio-temporelles. En réalité les stress azotés, ou plus globalement les stress de fertilité, s'appliquent de façon dynamique au cours du cycle.

3.5 Conclusion

Le modèle SARRA-H simule correctement le développement et la croissance des génotypes de mil en conditions agronomiques favorables (station de recherche). Le modèle CELSIUS a été correctement calé sur les données des parcelles des agriculteurs. Cependant, leur application en milieu paysan a été très peu performante, hormis les situations à faible pluviométrie où les prévisions avec SARRA-H sont bonnes. Des écarts de rendement importants dus au facteur fertilité du sol et éventuellement aux facteurs biotiques subsistent. Ces facteurs entraînent de fortes variabilités des rendements agricoles aux échelles du village qui rendent difficile le développement des méthodes de prévision agricole basées sur ces modèles écophysologiques à base bilan hydrique. La prise en compte de l'effet des réalités agronomiques, et en particulier de stress azotés à travers une baisse systématique du coefficient de conversion de l'énergie en biomasse s'est avérée peu opérationnelle pour le moment. L'utilisation d'un modèle qui prend en compte, en plus de la contrainte hydrique, la contrainte de fertilité de façon dynamique pourrait certainement permettre d'améliorer la prévision des rendements des situations de notre étude.

Chapitre 4 : Évaluation du modèle CERES-Millet pour la simulation des interactions eau-fertilité en culture de mil (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.) en vue de son utilisation éventuelle pour la prévision agricole au Sénégal

4.1 Introduction

La prévision agricole est une activité stratégique des États qui leur permet de mieux gérer leur sécurité alimentaire. Elle est d'une importance capitale en zone soudano-sahélienne où la variabilité pluviométrique affecte fortement les agricultures essentiellement pluviales. A la suite de la grande sécheresse du milieu des années 70 (Ndong, 1995), différents dispositifs de prévision des rendements des céréales ont été mis en place en Afrique de l'ouest. Parmi ceux-ci figure le CILSS qui exerce cette activité à travers le CRA. Le principal outil utilisé par le CRA est le modèle DHC, qui est fondé sur la détermination dans le temps de l'évapotranspiration réelle de la plante, en fonction de l'humidité du sol et de la demande évaporative (Samba, 1998). Le rendement est ensuite déterminé en fonction d'un indice de satisfaction des besoins en eaux de la culture. Le facteur limitant est donc uniquement la contrainte hydrique. Bien que donnant des bonnes indications sur les rendements potentiels dans les conditions à forte contrainte hydrique, des surestimations ont été notées lorsque la disponibilité en eau était adéquate (Baron *et al.*, 2009).

Par la suite, l'apport de modèles de simulation de la croissance de culture en prévision des rendements a été évalué, en l'occurrence le modèle SARRA-H (Muller *et al.*, 2009) et le modèle CELSIUS dans le cadre de cette thèse (cf. chapitre 3). Ces modèles intègrent une double approche (efficacité de l'eau et efficacité de la radiation) pour simuler la dynamique de la biomasse en s'appuyant sur des concepts et processus physiologiques. Mais des écarts importants, dus à d'autres facteurs limitants que la ressource hydrique, ont été notés entre rendements simulés et rendements des agriculteurs. Parmi ces facteurs, il y a le niveau de fertilité des parcelles paysannes qui est très faible en zone soudano-sahélienne (Affholder, 1994; Regmi *et al.*, 2002; van Ittersum *et al.*, 2003; Mueller *et al.*, 2012; Tittonell et Giller, 2013). Pour toute la région, le bilan d'éléments nutritifs dans le sol (différence entre les apports et les exportations par les cultures) a été évalué par (Pol et Traore, 1993). Les déficits en azote, potassium et magnésium ont été estimés respectivement à 25 kg.ha⁻¹, 20 kg.ha⁻¹ et 5 kg.ha⁻¹. Pour le mil, la perte d'éléments minéraux au travers des récoltes de grains est de l'ordre de 15 kg.ha⁻¹.an⁻¹ d'azote, 2 kg.ha⁻¹.an⁻¹ de phosphore et 15 kg.ha⁻¹.an⁻¹ de potassium pour un champ traditionnel du sud du Sahel (Buerkert et Hiernaux, 1998). Les éléments perdus au travers des prélèvements de fourrages, de bois de feu, de matières de construction, et aussi par le ruissellement, l'érosion éolienne et hydrique, le lessivage et la volatilisation ne sont pas restitués. Les jachères qui permettaient de le faire ont quasiment disparu des paysages agraires

sahéliens depuis bien longtemps (Ramaswamy et Sanders, 1992).

La fertilité est donc un facteur de premier plan dans la limitation des rendements du mil. Sa prise en compte adéquate dans la modélisation pourrait contribuer à réduire les écarts de rendement élevés obtenus avec les modèles qui ne l'intègrent pas comme SARRA-H et CELSIUS (cf. chapitre 3). Divers modèles de culture ont été développés pour simuler en plus du bilan hydrique, le bilan azoté (Brisson et *al.*, 2003; Jones et *al.*, 2003; Keating et *al.*, 2003; Bechini et *al.*, 2006). Parmi ces derniers, le modèle Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT) (Jones et *al.*, 2003) a retenu notre attention. En effet, le modèle *Crop Estimation through Resource and Environment Synthesis* (CERES-Millet), un sous-modèle de DSSAT, a déjà fait l'objet d'utilisation dans diverses études dans la région soudano-sahélienne (Fechter et *al.*, 1991; Thornton et *al.*, 1997; Jagtap et *al.*, 1999). En outre, en plus de prendre en compte la nutrition azotée dans les simulations, CERES-Millet est doté d'un module de photopériodisme, et donc pourrait être adapté aux cultivars traditionnels de la zone soudano-sahélienne.

Cette étude se propose donc d'évaluer l'apport de ce modèle complexe pour la prévision des rendements agricoles au Sénégal. Avant cette application, le modèle nécessitera un calage et une validation pour la prise en compte de l'interaction eau-fertilité.

4.2 Matériel et méthodes

4.2.1 Présentation du site d'étude

Les essais, dont les données ont été utilisées, ont été conduits à la station expérimentale du CNRA de Bambey (14,71°N, 16,48° W, 20 m). Le sol se caractérise par une texture sableuse comprenant plus de 95% de sables totaux et de faibles teneurs en carbone (0,20%), en azote total (0,15%) et en bases échangeables (0,7 mEq pour 100 g de calcium, 0,04 mEq pour 100 g de potassium et 0,5 mEq pour 100 g de magnésium). Le pH est compris entre 5,4 et 6,1 avec un faible pouvoir tampon. La capacité de rétention en eau est faible, de l'ordre de 4,5% dans les horizons de surface et de 6% dans les horizons de profondeur (Khouma, 2002). La saison pluvieuse couvre les mois de juin à octobre. La pluviométrie moyenne mensuelle est caractérisée par une forte variabilité inter-annuelle (figure 26). Les températures mensuelles les plus élevées sont notées aux mois d'avril et de mai. Les plus faibles amplitudes thermiques sont enregistrées durant la saison agricole (figure 12B).

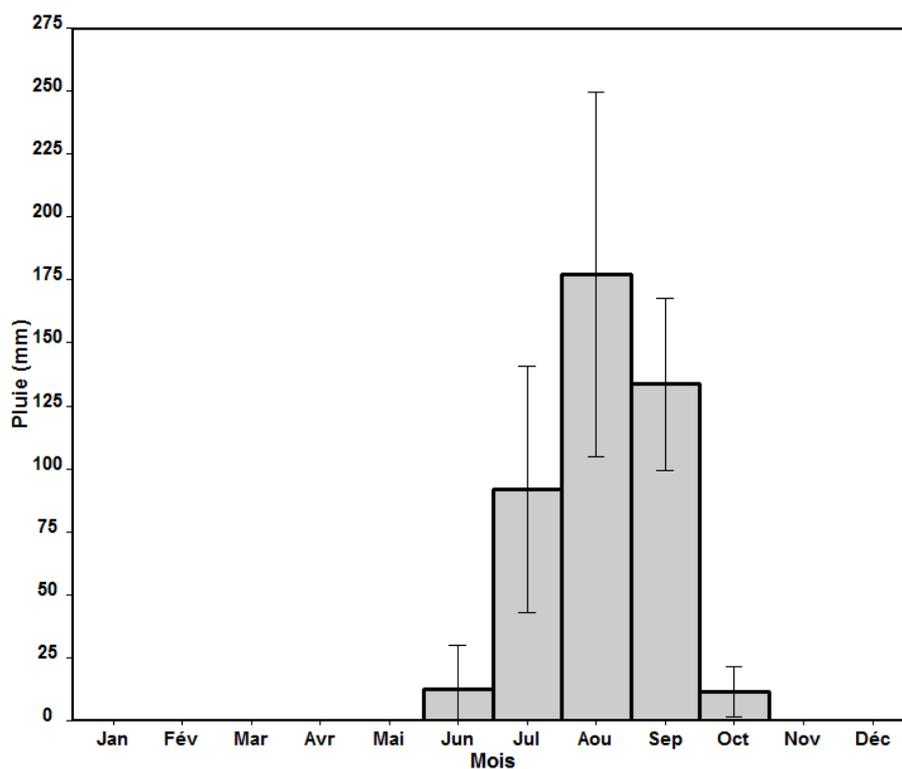


Figure 26 : Moyennes mensuelles des pluviométries du CNRA de Bambeï des années 1996, 1997, 1998 et 2012. Les barres d’erreur représentent les écarts-types

4.2.2 Données expérimentales

Les données expérimentales proviennent de divers essais conduits en hivernage sous différentes conditions d’alimentation hydrique et de fertilité (tableau V). La même densité de semis de 12 346 poquets.ha⁻¹ avec 3 plantes par poquet a été utilisée sur l’ensemble des essais. Selon les essais, différentes quantités d’engrais ont été apportées, en se référant aux recommandations de l’ISRA pour les apports maximaux (150 kg.ha⁻¹ de NPK et 100 kg.ha⁻¹ d’urée) et les dates d’application (le NPK appliqué au plus tard à la levée, la moitié de l’urée au démarrage à environ 15 jours après le semis et l’autre moitié à la montaison). Les essais ont été conduits sous de bonnes conditions agronomiques : labour, luttés préventives et à la demande contre les mauvaises herbes, les maladies, les ravageurs et les déprédateurs. Les irrigations de complément ont été faites par aspersion au moyen de rampes oscillantes. Des mesures de biomasse et de LAI ont été effectuées à différentes dates au cours des cycles.

Tableau V : Caractéristiques des essais

N° de l'essai	Date de semis	Dispositif expérimental	Dimension des parcelles et carrés de rendement	Variété	Dose de fertilisation	Régime hydrique	Paramètres observés
1	19/07/1996	Blocs complets randomisés, 3 répétitions	12 m x 12 m 5,4 m x 5,4 m	Souna 3	150 kg.ha ⁻¹ de NPK 14-7-7 et 100 kg.ha ⁻¹ d'urée	5 traitements – Pluvial strict – Pluvial + irrigation au stade végétatif – Pluvial + irrigation à la floraison – Pluvial + irrigation au stade de remplissage des grains – Régime irrigué	Phénologie, LAI, biomasse feuille, biomasse tige, rendement en grain
2	29/06/1997	Split-plots, 3 répétitions	12,6 m x 12,6 m 5,4 m x 5,4 m	Souna 3	150 kg.ha ⁻¹ de NPK 15-15-15 et 100 kg.ha ⁻¹ d'urée	2 traitements – Pluvial strict – Régime irrigué	Rendement en grain
3	22/07/1997	Split-plots, 3 répétitions	10,8 m x 10,8 m 3,6 m x 3,6 m	Souna 3	3 traitements – Aucun apport – 75 kg.ha ⁻¹ de NPK 15-15-15 et 50 kg.ha ⁻¹ d'urée – 150 kg.ha ⁻¹ de NPK 15-15-15 et 100 kg.ha ⁻¹ d'urée	2 traitements – Pluvial strict – Régime irrigué	Phénologie, LAI, biomasse feuille, biomasse tige, rendement en grain
4	24/07/1998	Split-plots, 3 répétitions	10,8 m x 10,8 m 3,6 m x 3,6 m	Souna 3	3 traitements – Aucun apport – 75 kg.ha ⁻¹ de NPK 15-15-15 et 50 kg.ha ⁻¹ d'urée – 150 kg.ha ⁻¹ de NPK 15-15-15 et 100 kg.ha ⁻¹ d'urée	Régime irrigué	Phénologie, LAI, biomasse feuille, biomasse tige, rendement en grain
5	26/06/2012	Split plots, 3 répétitions	7,2 m x 7,2 m 3,6 m x 3,6 m	Sanio de Séfa	2 traitements – Aucun apport – 150 kg.ha ⁻¹ de NPK 15-15-15 et 100 kg.ha ⁻¹ d'urée	2 traitements – Pluvial strict – Régime irrigué	Phénologie, biomasse feuille, biomasse tige, rendement en grain

4.2.3 Description du modèle CERES-Millet

Le modèle CERES-Millet fait partie de la plateforme modulaire DSSAT. C'est un modèle de simulation du développement, de la croissance et du rendement du mil, fonctionnant à pas de temps journalier. Les données d'entrée du modèle concernent les caractéristiques du sol (physiques et chimiques), du climat (données journalières), de la culture (caractéristiques de développement), et les pratiques culturales. Le modèle intègre divers processus pour la simulation des bilans hydrique, carboné et azoté des cultures (IBSNAT, 1990). C'est la version 4.5 de DSSAT qui a été utilisée pour cette étude.

Le bilan hydrique est basé sur le modèle de Ritchie (1998) qui considère un sol unidimensionnel dont le profil peut comprendre plusieurs couches. L'eau (pluie ou irrigation) s'infiltré dans la couche supérieure du profil après extraction du ruissellement selon la méthode USDA-SCS (Soil Conservation Service, 1972), telle que modifiée par Williams *et al.* (1984). Le drainage est calculé selon une approche en cascade dans laquelle l'excès d'eau au-delà de la capacité au champ d'une couche est reversé automatiquement dans la couche inférieure. Le drainage ne se produit pas lorsque l'humidité du sol est inférieure à la capacité au champ. Les processus de transpiration et d'évaporation sont séparés. L'évaporation est fonction de la quantité d'énergie reçue à la surface du sol. La transpiration est proportionnelle à la quantité d'énergie interceptée par le couvert.

Le bilan de l'azote et de la matière organique du sol peut être simulé soit avec le module de GODWIN (Godwin et Jones, 1991), soit avec le module CENTURY développé par Gijsman *et al.* (2002) et basé sur le modèle de Parton *et al.* (1988). Dans le cas de cette étude, c'est le module CENTURY qui a été utilisé parce que plus adapté aux sols pauvres. CENTURY simule la minéralisation, la nitrification et la dénitrification, l'hydrolyse de l'urée, la volatilisation de l'ammoniac pour les différentes formes de l'azote, de fertilisants organiques, de fumier et d'engrais. La décomposition de la matière organique est fonction de la température du sol et de l'eau dans le sol. Les variables d'entrée du modèle sont relatives aux propriétés du sol ainsi que des sorties du module bilan hydrique. Le transport d'azote à travers les couches de sol est piloté par les flux d'eau du sol. Un facteur de fertilité du sol (SLPF), variant de 0 à 1, permet de prendre en compte l'effet des éléments nutritifs autres que l'azote, sur la croissance journalière en biomasse de la plante : sa réduction permet de diminuer les biomasses et rendements simulés.

Le développement phénologique dépend des températures en relation à 2 températures cardinales : la température de base (TBASE) et la température optimale (TOPT). Le cycle est découpé selon les 6 phases suivantes : germination-levée (P0), phase végétative de base (P1), phase sensible à la

photopériode (P2), phase reproductrice allant de l'initiation paniculaire au déploiement de la feuille drapeau (P3), phase de floraison et de fécondation allant jusqu'au début du développement des grains, soit quelques jours après la fécondation (P4), puis la phase de remplissage des grains allant jusqu'à la maturité physiologique (P5). La durée de la phase photopériodique dépend de la valeur de la photopériode critique (P2O) et du coefficient de sensibilité au photopériodisme (P2R).

Les processus de croissance (photosynthèse, expansion des feuilles, croissance des grains, mobilisation de l'azote) dépendent aussi d'une température de base et d'une température optimale. Le module de croissance calcule la matière sèche potentielle comme une fonction linéaire du rayonnement photosynthétiquement actif (PAR) intercepté. Le taux de PAR intercepté par le couvert est une fonction exponentielle du LAI. La matière sèche est allouée aux feuilles, à la tige et aux grains selon des coefficients de répartition qui varient selon le stade phénologique et qui sont sous l'influence des stress hydriques et azotés.

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

4.2.4 Calage du modèle CERES-Millet

Le calage du modèle CERES-Millet a été effectué en 3 étapes : d'abord en conditions non limitantes, ensuite en conditions de stress hydrique, et enfin en conditions de stress azoté.

La première étape du calage a eu pour objectif d'ajuster en l'absence de toute contrainte le développement phénologique, puis la croissance des biomasses y compris les rendements en grains. Les traitements qui ont permis de faire ce calage ont été obtenus en condition d'irrigation à évapotranspiration maximale (ETM) et avec la dose de fertilisation recommandée (F2). La valeur du SLPF a été maintenue à 1. Le calage a consisté à définir les valeurs de certains paramètres, en particulier ceux qui régulent les phases phénologiques, afin de minimiser les différences entre valeurs observées et valeurs prédites pour les dates de floraison et maturité, le LAI, les biomasses aériennes et le rendement en grain. Les données observées qui ont servi au calage proviennent pour le Souna des essais 1, 2, et 4, décrits plus en détail par (Diouf, 2000; Diouf *et al.*, 2004) et pour le Sanio de l'essai 5 (cf. tableau V).

La deuxième étape a consisté à étudier les réponses du modèle ainsi paramétré dans différentes situations hydriques, dont toutes celles avec contrainte hydrique, mais en condition non limitante d'azote et d'autres éléments fertilisants (SLPF égal à 1). Les résultats des simulations sont d'abord comparés aux observations puis sont améliorés par ajustement notamment des paramètres régulant les développements des biomasses et le bilan hydrique. Le paramétrage est effectué avec les données de l'essai 1 (cf. tableau V).

Enfin, la troisième étape de calage a porté sur l'étude du comportement du modèle en relation à la fertilité du sol et aux apports d'engrais. Elle consiste à vérifier si le modèle donne des réponses satisfaisantes en conditions non limitantes d'eau et avec différentes doses d'azote. Les données de l'essai 4 (cf. tableau V) ont été utilisées pour cette étape.

4.2.5 Validation du modèle CERES-Millet

La validation a porté uniquement sur le rendement en grain. Les données qui ont servi à la validation de CERES-Millet sur le Souna proviennent de l'essai 3 (cf. tableau V). Pour évaluer la performance du modèle, une combinaison de représentations graphiques et de mesures statistiques a été utilisée. Les paramètres statistiques retenus sont la valeur de la racine de l'erreur quadratique moyenne relative (RRMSE) et l'indice d'agrément (IA) (Willmott, 1982). La RRMSE est exprimée en pourcentage (%) et l'IA est exprimé en valeur relative. Un modèle ayant une bonne performance a des valeurs de RRMSE et d'IA qui tendent respectivement vers 0 et 1.

$$RRMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \quad (7)$$

$$IA = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - \bar{P}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (13)$$

où P_i = valeur prédite, O_i = valeur observée, n = nombre de cas considérés, \bar{P} = moyenne des valeurs prédites, \bar{O} = moyenne des valeurs observées.

4.2.6 Application à la prévision des rendements des agriculteurs

L'application à la prévision des rendements a consisté à simuler les rendements de 41 villages-années (cf. chapitre 3). Les données journalières de pluie (tableau IV) proviennent de pluviomètres manuels installés dans chaque village. Les données climatiques du BAN proviennent de Bambey, celles du BAS de Nioro et celles de la H-C de Kolda, qui sont les stations synoptiques les plus proches. Les densités de population retenues, en considérant 4 plants par poquet chez les

agriculteurs, sont les valeurs moyennes des différentes zones : 4,94 plants.m⁻² pour le BAN, 10,26 plants.m⁻² pour le BAS et 16 plants.m⁻² pour la H-C. Les paramètres de sol (tableau VI) proviennent des travaux de Diouf (2000) pour les sols *Dior* et de Charreau et Nicou (1971) pour les sols *Deck*. Certains paramètres de sols (albédo, conductivité hydraulique) ont été estimés par des méthodologies internes au modèle et sur la base des caractéristiques physiques qui sont renseignées. Les simulations ont été faites sans apport d'engrais, comme cela est le cas dans la réalité, et également en considérant qu'il n'y a pas d'apport de matière organique.

Tableau VI : Caractéristiques des sols de l'étude

Type de sol	Profondeur (cm)	Argile (%)	Limon (%)	Carbone organique (%)	pH	Capacité d'échange cationique (cmol.kg ⁻¹)	Azote total (%)	Capacité au champ (mm)	Point de flétrissement permanent (mm)	Saturation (mm)	Densité apparente (g.cm ⁻³)
Dior	10	3,5	1,7	0,169	5,6	2	0,02	0,089	0,028	0,4	1,53
	20	3,6	1,8	0,201	5,8	1,7	0,02	0,092	0,039	0,403	1,52
	40	5,6	2,8	0,155	5,7	2,2	0,02	0,103	0,048	0,393	1,55
	300	5,6	2,8	0,155	5,7	2,2	0,02	0,103	0,048	0,393	1,55
Deck	12	8,8	3,5	0,4	5,3	2,1	0,03	0,133	0,079	0,355	1,65
	40	12,8	3,5	0,3	5,6	1,9	0,02	0,152	0,098	0,356	1,65
	60	14,5	3,8	0,4	5,8	2,2	0,02	0,167	0,109	0,355	1,65
	100	13	3,5	0,3	5,9	2,8	0,01	0,153	0,099	0,356	1,65
	300	13	3,5	0,3	5,9	2,8	0,01	0,153	0,099	0,356	1,65

4.3 Résultats

4.3.1 Calage du modèle CERES-Millet

4.3.1.1 Calage de la phénologie et de la croissance en biomasse du Souna en conditions non limitantes

Les valeurs de TBASE et TOPT ont été fixées respectivement à 11°C et 34°C pour les 2 variétés (Souna et Sanio) conformément à divers travaux sur le mil (Garcia-Huidobro *et al.*, 1982; van Oosterom *et al.*, 2001).

Les durées des phases 1 et 5 ont été d'abord ajustées à l'aide des paramètres P1 et P5. Le paramétrage obtenu (P1= 385 °C.j et P5 = 400 °C.j) a donné une concordance satisfaisante pour les dates de floraison et maturité. Cependant la dynamique foliaire était mal simulée avec un retard important du développement du LAI et une forte surestimation des biomasses végétales. Pour obtenir des développements des surfaces foliaires et des biomasses aériennes acceptables, et faute de pouvoir agir sur la valeur initiale de la surface foliaire spécifique (SLA), car celle-ci est fixée dans le code, la valeur du coefficient de la taille relative de la feuille (G1) a été augmentée à 3. La

longueur de la phase 1 a été également réduite à 250 °C.j (environ 12 jours) au lieu de 385°C.j (19 jours) observés, ce pour produire moins de feuilles, et donc réduire la biomasse végétative. Pour le calage du rendement en grain, le coefficient d'allocation des assimilats dans la panicule (G4) a été fixé 0,60 et la durée de la phase P5 a été réduite à 380°C.j (environ 19 jours).

Ces différentes valeurs de paramètres ont permis d'obtenir un calage globalement satisfaisant des longueurs de cycle, des dynamiques des biomasses et des rendements. Cependant il faut souligner que les cycles simulés sont plus courts d'environ 7 jours en 1997 et 4 jours en 1998. Le cycle simulé en 1996 a été plus long de 3 jours, en particulier parce que la récolte a été très précoce dans la réalité (76 jours). Les dates de floraison mâle sont plus tardives de 4 à 13 jours selon l'année. Malheureusement, il est impossible d'ajuster la durée de la phase 4 qui est anormalement fixée dans le code à 8 jours alors qu'en réalité elle est d'environ 15 jours. De plus les valeurs de LAI maximal et de biomasses aériennes sont surestimées par le modèle (figure 27A et 27B) du fait d'une croissance anormalement continue de la tige après la floraison. Le calage du rendement en grain est par contre satisfaisant (figure 27C).

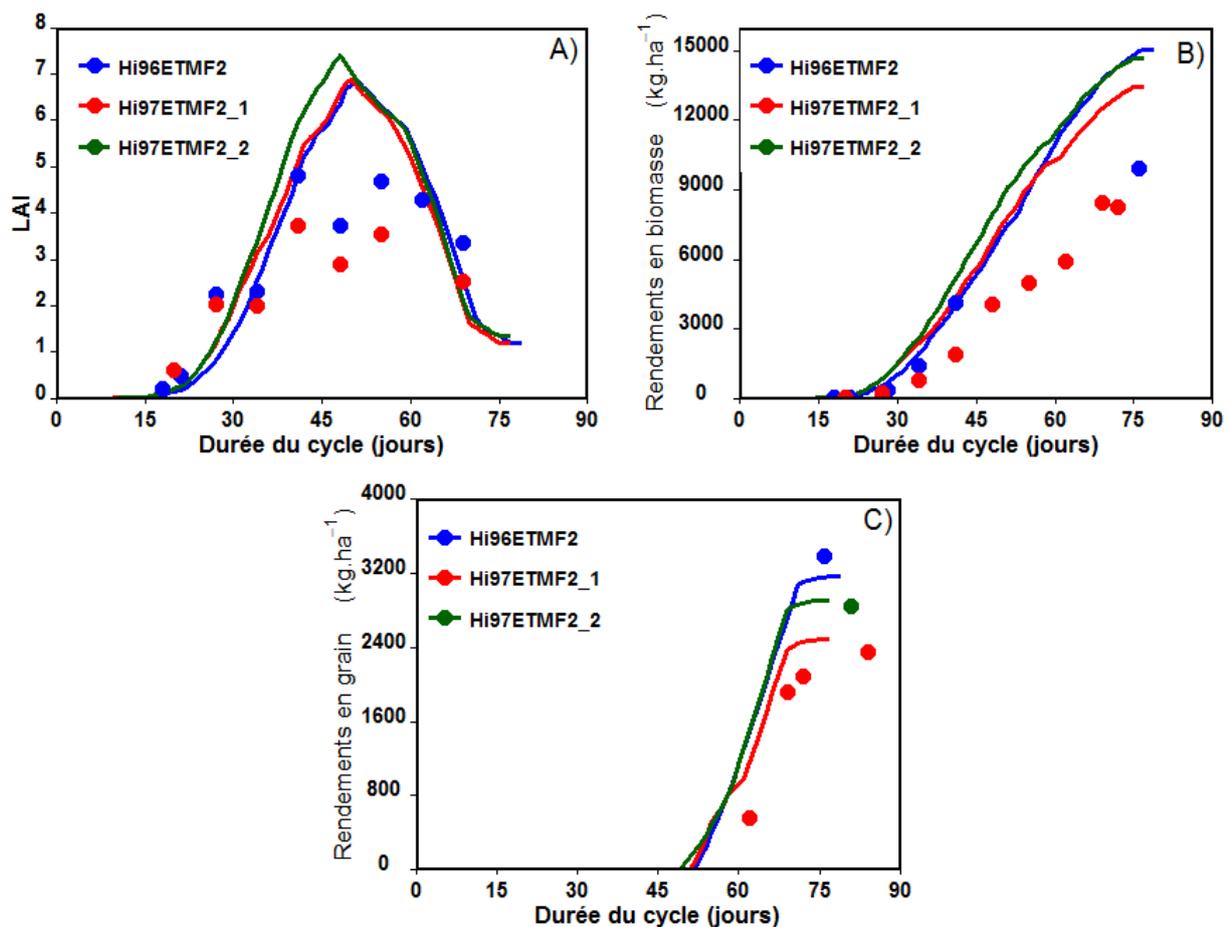


Figure 27 : Résultats du calage du Souna en conditions non limitantes pour le LAI (A), la biomasse aérienne (B) et le rendement en grain (C). Les points représentent les valeurs observées et les lignes continues les valeurs simulées

4.3.1.2 Calage de la croissance en biomasse et du rendement du Souna sous différentes conditions d'alimentation hydrique

Le modèle tel qu'il a été paramétré en conditions non limitantes permet d'obtenir des valeurs de rendements satisfaisantes sous différentes conditions hydriques (figure 28C). Cependant, le LAI maximal et les biomasses restent surestimés (figures 28A et 28B). A noter que le LAI ne semble pas être affecté par les contraintes hydriques. Cette étape n'a pas impliqué d'ajustement de paramètre.

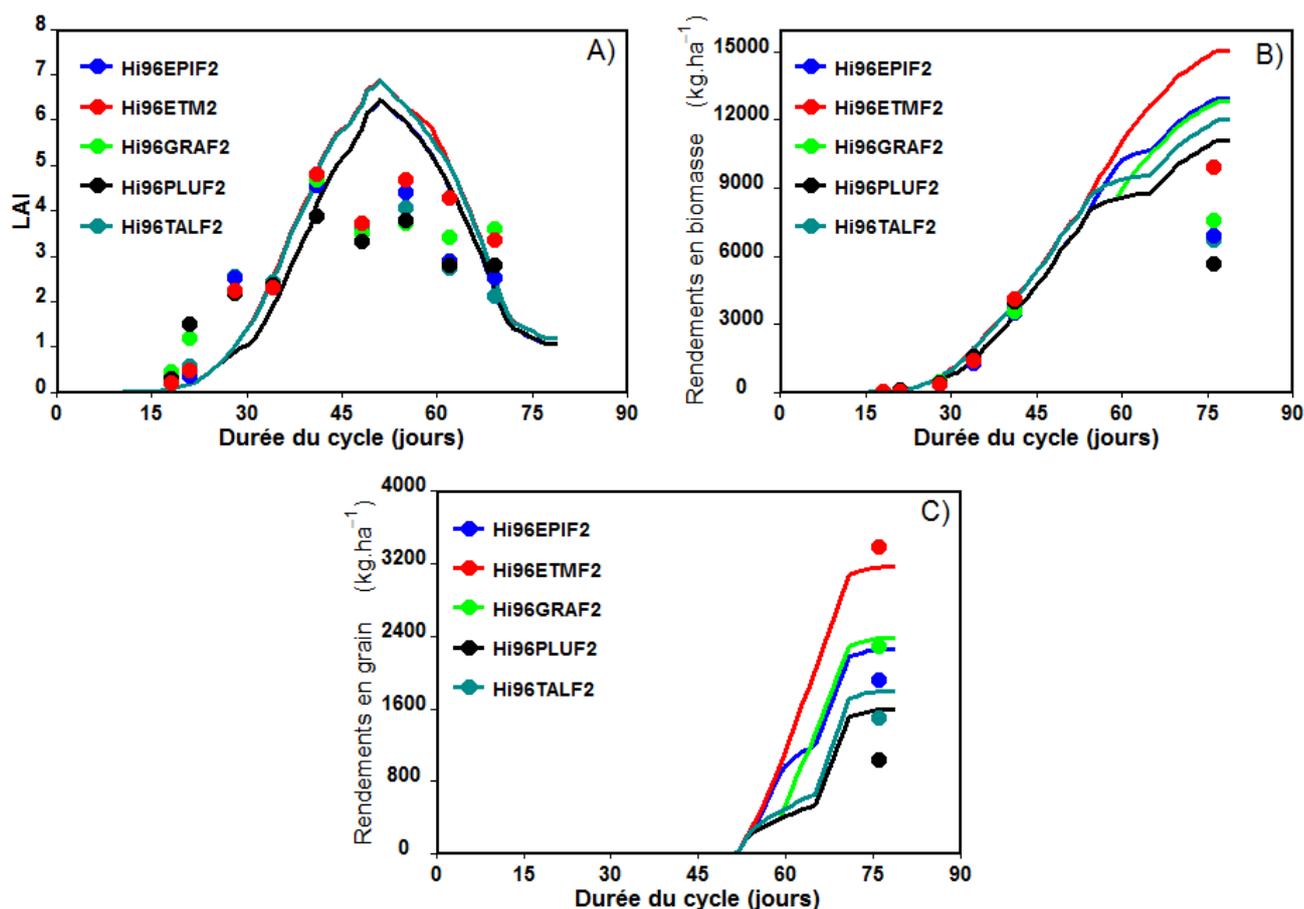


Figure 28 : Résultats du calage du Souna sous différentes conditions d'alimentation hydrique pour le LAI (A), la biomasse aérienne (B) et le rendement en grain (C). Les points représentent les valeurs observées et les lignes continues les valeurs simulées

4.3.1.3 Calage de la croissance en biomasse et du rendement du Souna sous différentes conditions de fertilité

Pour la prise en compte de la fertilité, le paramétrage initial du modèle n'a pas été satisfaisant. CERES-Millet semble très sensible à la fertilisation azotée. Une analyse de sensibilité a donc été effectuée sur la quantité initiale d'azote dans le sol (dont la valeur par défaut dans CERES-Millet est de 500 kg.ha⁻¹). La quantité qui a permis une bonne simulation de la réponse du mil aux

conditions agronomiques évaluées a été de $300 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ alors qu'en réalité pour les sols *Dior*, sur la base des analyses de sol (Niane Badiane *et al.*, 2000), la quantité initiale peut être estimée à environ $1000 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$. Cette valeur permet de simuler correctement les rendements en grain mais le LAI et la biomasse aérienne sont toujours surestimés (figures 29).

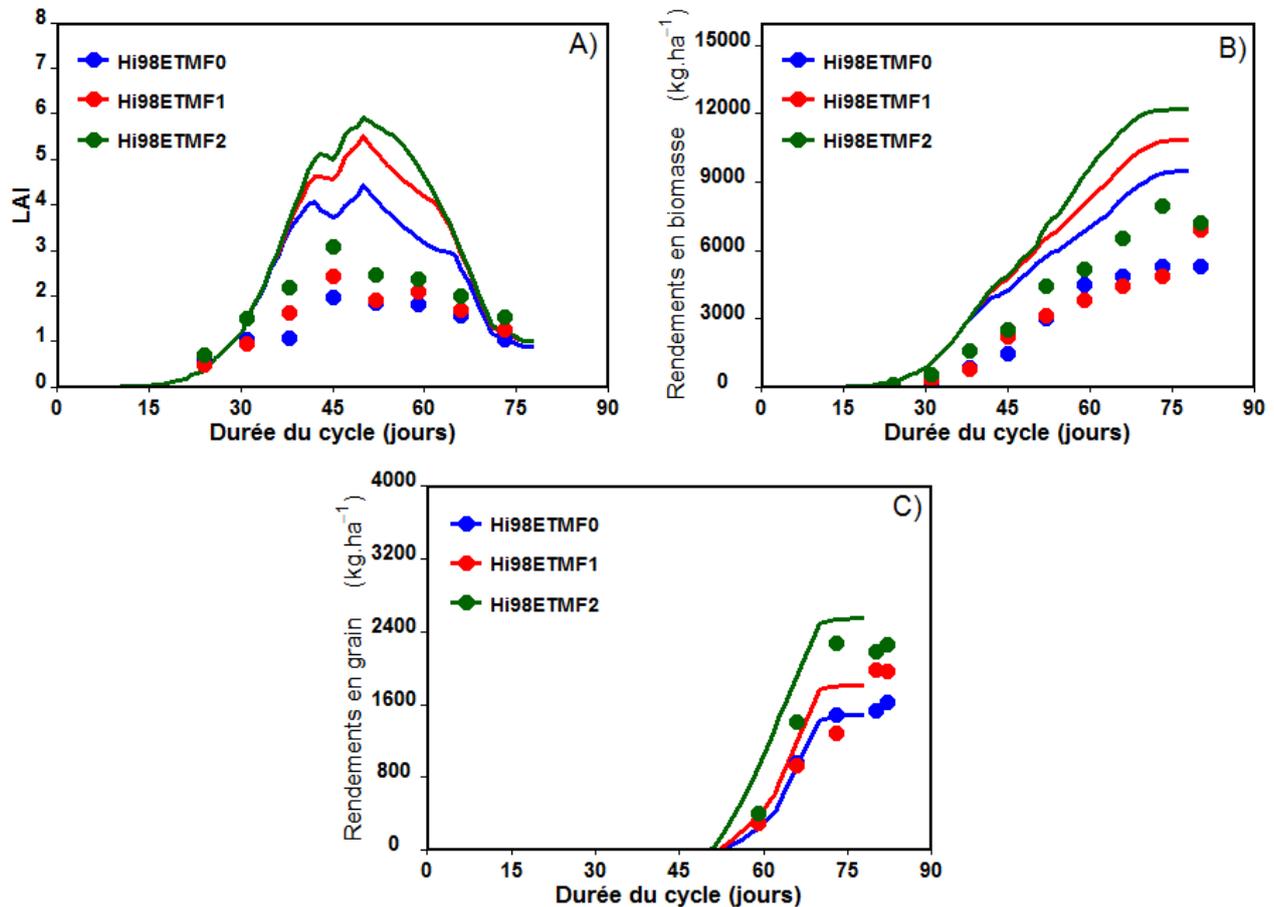


Figure 29 : Résultats du calage du Souna sous différentes conditions d'alimentation azotée pour le LAI (A), la biomasse aérienne (B) et le rendement en grain (C). Les points représentent les valeurs observées et les lignes continues les valeurs simulées

4.3.1.4 Calage de la phénologie et de la croissance en biomasse du Sanio

La démarche utilisée pour le Souna a été reprise pour le Sanio. Ainsi, les valeurs de paramètre qui ont permis une bonne simulation de la phénologie sont de $423^{\circ}\text{C} \cdot \text{j}$ pour P1, 12,55 heures pour P20 et $999^{\circ}\text{C} \cdot \text{j}$ pour P2R. Pour le rendement en grain, les valeurs de G4 et de P5 ont été fixées respectivement à 0,44 et $350^{\circ}\text{C} \cdot \text{j}$. Avec ce paramétrage, le calage du rendement en grain et de la croissance en biomasse a été satisfaisant, mais le LAI a été fortement surestimé surtout pour les traitements avec la dose de fertilisation élevée (Hi12ETMF2 et Hi12PLUF2) (figure 30).

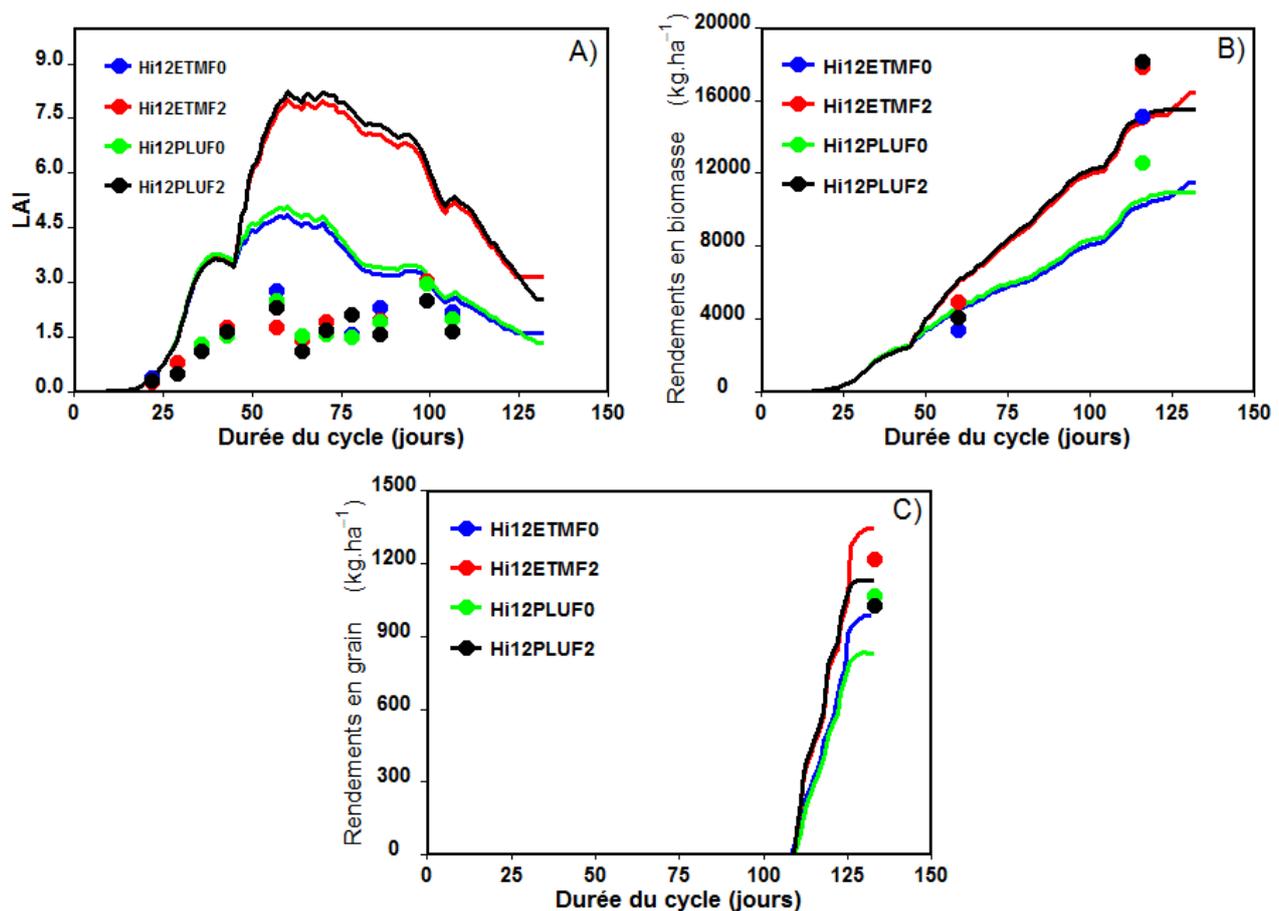


Figure 30 : Résultats du calage du Sanio sous différentes conditions d'alimentation hydriques et azotées pour le LAI (A), la biomasse aérienne (B) et le rendement en grain (C). Les points représentent les valeurs observées et les lignes continues les valeurs simulées

4.3.2 Validation du modèle CERES-Millet

La validation du modèle sur le rendement en grain du Souna a été faite avec les données de l'essai 3 (cf. tableau V) dont les traitements combinent différentes conditions hydriques et d'apports fertilisants. La validation est satisfaisante pour l'ensemble des points. Les résultats donnent un IA de 0,88 et une RRMSE de 14% (figure 31). Ainsi, malgré les mauvaises simulations des LAI et biomasses, qui sont surestimés, le modèle a une bonne capacité d'estimation du rendement en grain du Souna dans les conditions des essais. Nous avons donc considéré que le modèle ainsi calé et validé pouvait être utilisé pour une application à la prévision des rendements.

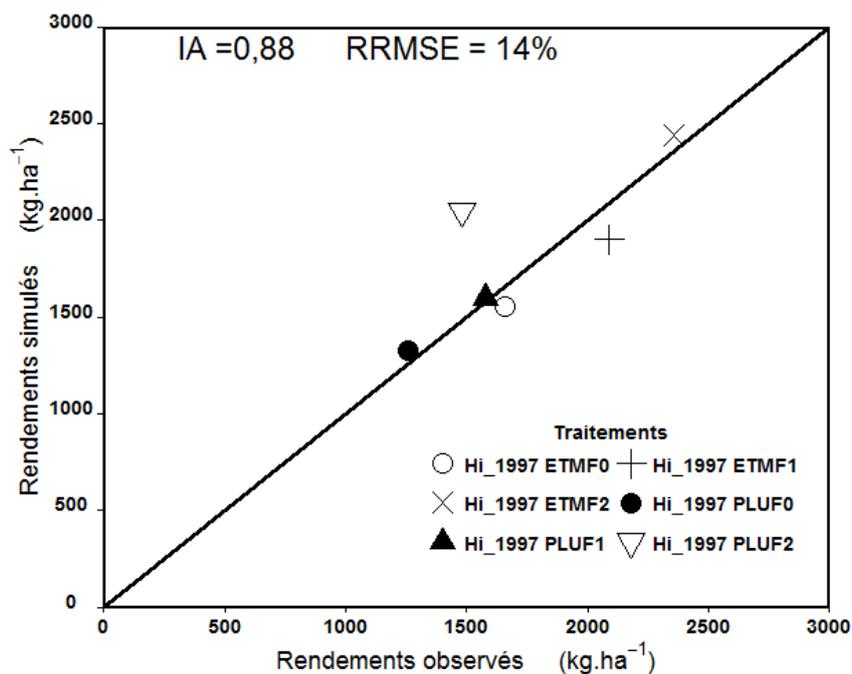


Figure 31 : Résultats de la validation du Souna sur le rendement en grain

La validation sur le Sanio n'a pu être effectuée. Pour la réaliser nous ne disposons, comme données indépendantes, que celles relatives à un semis de contre-saison (02 avril 2012) du cultivar calibré en condition d'hivernage. Pour cette date de semis très particulière, le modèle a été incapable de simuler correctement le cycle du cultivar. En effet, les écarts entre durées maximale et minimale du jour sur la période de l'essai sont faibles (moins d'une heure) dans cette zone. Du fait de ces faibles écarts associés à une valeur faible de P2R (999°C.j) déterminée pour la condition d'hivernage, le modèle n'a pu reproduire l'effet prononcé du photopériodisme sur le cultivar qui dans la réalité a allongé la durée de sa phase P2 à 2 180°C.j. Cela souligne les limites des algorithmes de simulation de la sensibilité au photopériodisme, en particulier en dehors des périodes « normales » de semis. Cependant, le calage du Sanio ayant été effectué en hivernage, nous avons estimé qu'il pouvait être utilisé pour notre étude qui porte sur des semis d'hivernage.

4.3.3 Application à la prévision des rendements des agriculteurs

L'application à la prévision des rendements montre un écart important entre les rendements simulés et les rendements moyens des villages-années (figure 32A). Les valeurs de RRMSE et d'IA, de 155% et 0,45 sont très éloignées respectivement de 0 et de 1, qui permettent d'assumer que le modèle a une bonne capacité de prédiction. Ainsi, le modèle tel que calé et validé selon les conditions de station ne permet pas de faire une bonne prévision des rendements moyens à l'échelle des villages, le niveau de fertilité des parcelles paysannes étant très faible.

Nous avons donc estimé qu'en faisant baisser la valeur du SLPF, les rendements simulés pourraient plus refléter la réalité paysanne. Une analyse de sensibilité a donc été effectuée sur ce facteur. La valeur de SLPF qui a permis d'avoir une faible RRMSE doublée d'un IA élevé est de 0,62. Les résultats avec cette dernière montrent une nette amélioration des résultats de simulation des rendements pour l'ensemble des villages-années, avec une RRMSE et un IA respectivement de 39% et de 0,82 (figure 32B).

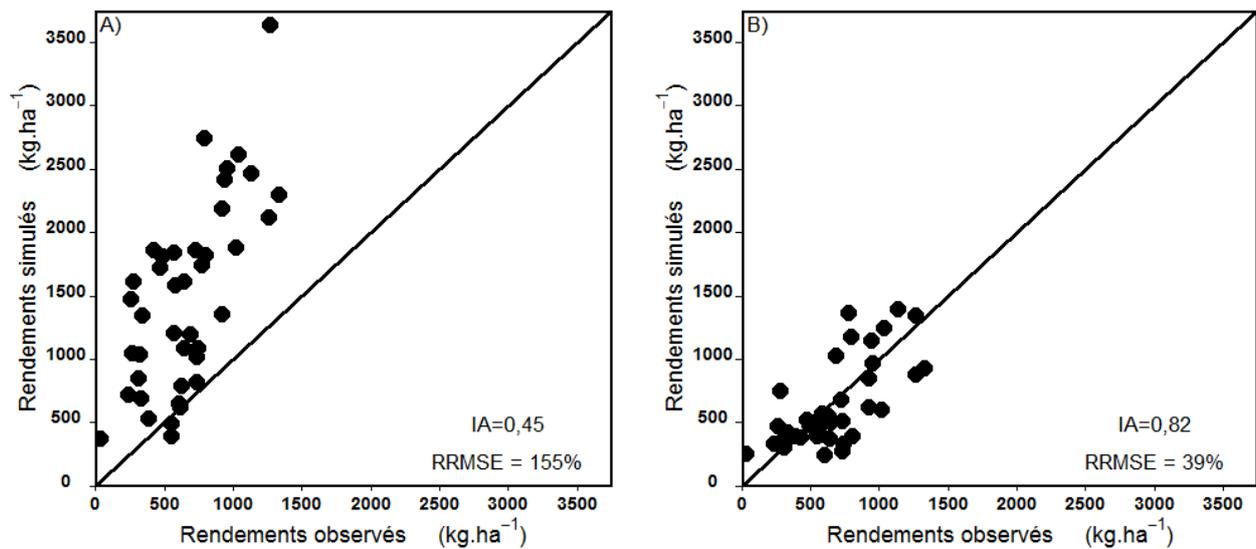


Figure 32 : Rendements simulés en fonction des rendements des agriculteurs des villages-années pour des valeurs de SLPF de 1 (A) et de 0,62 (B)

Mais malgré ce résultat satisfaisant dans l'ensemble, il faut remarquer que la valeur du SLPF qui permet des résultats satisfaisants dépend de la zone. Dans le BAN, les rendements des villages-années sont en moyenne sous-estimés avec un SLPF de 0,62. Il faudrait augmenter le coefficient à 0,65 pour avoir une simulation acceptable, soit une RRMSE de 42% et un IA de 0,68. Dans le BAS + H-C au contraire, les rendements sont surestimés et il faudrait baisser le coefficient à 0,60 pour avoir des simulations acceptables (RRMSE = 29% et IA=0,63).

Par ailleurs, certaines années ont été mieux simulées que d'autres. Dans le BAN, les années 2006 et 2012 ont été moins bien simulées que les autres. Ces 2 années ont enregistré les rendements moyens les plus élevés du BAN. Dans le BAS + H-C, les années les moins bien simulées (1991 et 2012) ont enregistré les rendements moyens les plus faibles. Ainsi, durant les mauvaises années, la performance du modèle est meilleure dans le BAN, contrairement au BAS + H-C où le modèle est performant durant les bonnes années (Figure 33).

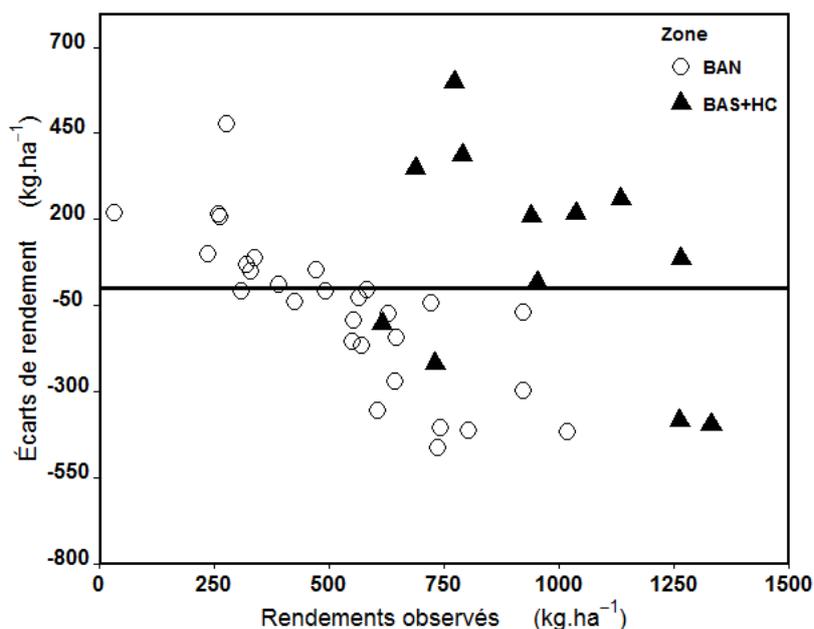


Figure 33 : Écart de rendement en fonction des rendements des agriculteurs des villages-années dans le BAN et le BAS + H-C

4.4 Discussion

L'application du modèle CERES-Millet à la prévision des rendements a nécessité d'abord son évaluation pour la prise en compte de l'interaction eau-fertilité. Si pour le rendement en grain les résultats ont été globalement satisfaisants, le calage du LAI et de la biomasse aérienne a été moins bon. CERES-Millet surestime systématiquement la surface foliaire du fait de la valeur trop élevée du coefficient de la taille relative de la feuille. Or la photosynthèse est étroitement liée au couvert ; il en résulte donc aussi une surestimation de la biomasse produite. Ce dysfonctionnement avait déjà été soulevé par Fechter *et al.* (1991) qui, dans son étude à Tara au Niger, avait remarqué que le modèle surestimait le LAI et la biomasse respectivement de 46% et 40%. Un ajustement de la valeur initiale de la SLA aurait pu permettre de mieux caler le LAI et donc la biomasse. Mais cette dernière est codée et toute modification va nécessiter de disposer du code source du modèle. Le calage et la validation du rendement en grain ont été par contre globalement satisfaisants. Il n'y a eu qu'en condition pluviale en 1997 et avec la dose de fertilisation recommandée par l'ISRA que le rendement observé, particulièrement faible, a été surestimé. Ce traitement a été particulièrement affecté par une pluviométrie faible et mal répartie (Diouf, 2000; Diouf *et al.*, 2004). En effet, le déficit hydrique diminue la disponibilité de l'azote minéral du sol et le grain est d'autant plus affecté par le déficit hydrique que sa nutrition azotée est bonne (Diouf, 2000; Diouf *et al.*, 2004).

Le modèle ainsi calé et validé en station sur le rendement en grain a été utilisé pour la simulation

des rendements des villages-années. Mais malgré la prise en compte des facteurs hydrique et azoté des écarts importants ont été constatés entre rendements simulés et observés. Ces écarts pourraient être en partie dus à des facteurs biotiques (insectes, maladies, adventices). Mais les suivis-enquêtes de parcelles paysannes n'ont pas été orientés spécifiquement vers l'estimation des dégâts de ces facteurs. Nous ne pouvons donc être conclusifs sur leurs contributions réelles aux écarts. Par ailleurs, parmi les facteurs limitants, il se pourrait qu'il y ait aussi le faible niveau de fertilité en phosphore des parcelles (Bationo et Mokwunye, 1991). Selon Manu *et al.* (1991), les niveaux de phosphores dans les sols sont faibles : le phosphore assimilable des sols sahéliens est moins de 2 mg.kg^{-1} quand le niveau de phosphore total varie entre 25 et 340 mg.kg^{-1} avec une moyenne de 109 mg.kg^{-1} . Le phosphore est donc l'un des facteurs limitants les plus importants au Sahel et dont la déficience affecte selon Smithson et Giller (2002) plus de 40% des sols. CERES-Millet ne prend pas en compte spécifiquement le phosphore, mais le fait à travers le SLPF qui représente l'effet de la fertilité globale, au-delà de l'azote, sur la croissance journalière de biomasse. Nous avons estimé que la réduction de ce coefficient pourrait permettre d'être plus proches des conditions paysannes du Sénégal, dont les sols sont très pauvres surtout en phosphore (Charreau et Fauck, 1965; Khouma, 2002). Plusieurs chercheurs ont également utilisé cette approche dans le même but. Des coefficients variant de 0,63 à 1 ont été utilisés dans des pays comme les États-Unis (Singh *et al.*, 2013), l'Inde (Singh *et al.*, 1994) ou le Ghana (Naab *et al.*, 2004). En baissant le coefficient, la performance du modèle CERES-Millet s'améliore considérablement dans nos conditions. En outre, une valeur de SLPF a été déterminée pour chaque zone. Dans le BAN où les sols sont plus pauvres, le SLPF a été augmenté et dans les zones sud dont les sols sont plus riches, il a été abaissé.

Cependant, comme tout modèle complexe, CERES-Millet nécessite beaucoup d'informations d'entrées dont les plus difficiles à obtenir sont les informations sur les sols. Thornton *et al.* (1997) ont obtenu des résultats satisfaisants par le passé en utilisant, dans le cadre d'une étude d'estimation des rendements du mil au Burkina Faso avec CERES-Millet, des informations pédologiques fournies par la carte d'aptitude des sols du Burkina Faso établie par l'ex-Office de la Recherche Scientifique et Technique d'Outre-Mer (ORSTOM), aujourd'hui devenu l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD) à une échelle de 1:500 000. Dans notre cas, nous pourrions envisager une connexion à une base de données pédologique spatialisée. A cet effet, le WISE *database* de l'*International Soil Reference and Information Centre* (ISRIC) (<http://www.isric.org/>) peut constituer une alternative pour la constitution d'une cartographie des sols du Sénégal dédiée à une utilisation en prévision des rendements. Par ailleurs, CERES-Millet nécessitera un paramétrage sur les principaux cultivars de mil du Sénégal. Mais avant, les divers problèmes rencontrés dans le fonctionnement de la phénologie et dont la solution aura besoin de disposer du code devront être

résolus. Il s'agit du blocage de la levée à 5 jours au lieu de 3, du blocage de la durée de la phase de la ligulation de la feuille drapeau au début du remplissage du grain (P4) à 8 jours au lieu de 15, des problèmes liés au paramétrage de la sensibilité au photopériodisme.

Il sera utile également d'apporter des solutions à d'autres problèmes identifiés dans la structure du modèle. Il s'agit des problèmes liés à la surestimation de la surface foliaire qui entraîne également une surestimation de la biomasse, à la mauvaise répartition de la biomasse entre tiges et feuilles, à la croissance continue de la tige même après la floraison. Enfin il y a le problème de la forte sensibilité du modèle à la teneur en azote du sol qui résulte certainement du fait que certains modules du modèle CERES-Millet dérivent de CERES-Maize. Le maïs est en effet beaucoup plus sensible au stress azoté que le mil.

4.5 Conclusion

L'étude a permis de caler le modèle CERES-Millet sur le Souna et le Sanio pour les conditions de culture au Sénégal. Pour la croissance en biomasse, les résultats ont été moins bons au contraire du rendement en grain qui a été calé de façon satisfaisante. Le modèle a eu une bonne performance en station pour la simulation du rendement en grain. Mais en milieu paysan, un écart important a été constaté entre rendements des agriculteurs et rendements simulés par le modèle.

En réduisant le facteur de fertilité, nous avons pu prendre en compte le faible niveau de fertilité des parcelles paysannes et améliorer nettement la prévision des rendements des agriculteurs à l'échelle villageoise. Mais des études doivent être poursuivies dans cette voie avant de pouvoir proposer un modèle apte à être utilisé pour faire de la prévision agricole au Sénégal et ce, à condition de disposer d'informations sur les principaux types de sols du pays. Par ailleurs, les simulations pourraient être améliorées si des solutions étaient apportées à un certain nombre de problèmes identifiés lors du calage. Ces problèmes sont liés au calage du développement phénologique, de la croissance en biomasse et la forte sensibilité du modèle à la fertilisation azotée. Des discussions sont en cours avec l'équipe de DSSAT à Gainsville en Floride au États-Unis (<http://dssat.net/>) pour récupérer le code afin de tenter d'apporter des solutions à ces problèmes. Les résultats de recherches feront l'objet de publications sous-forme d'article.

Conclusion générale et perspectives

Dans cette thèse, nous avons cherché à voir dans quelle mesure la prévision agricole au Sénégal pouvait être améliorée en utilisant des modèles de simulations de la croissance des cultures. Plus précisément, nous avons cherché à apporter quelques éléments de réponses à la question suivante : « quels sont les apports d'abord d'un modèle écophysologique à base bilan hydrique, puis d'un modèle plus complexe qui gère l'interaction eau-fertilité pour la prévision des rendements du mil au Sénégal » ?

La première partie de la thèse a permis de faire une revue des systèmes de prévision actuels au Sahel et des différents outils utilisés. Il ressort de cette revue que plusieurs systèmes de gestion de la sécurité alimentaire en général, et de la prévision des rendements en particulier existent au Sahel. Parmi eux, le CILSS s'occupe particulièrement de la prévision des rendements pour les gouvernements des pays de l'Afrique de l'ouest, du Tchad et du Cameroun. Il utilise pour cela un modèle simple, appelé DHC, qui calcule le rendement à partir d'un indice synthétique de bilan hydrique. Mais le DHC connaît des limites dans la mesure où il n'a été calibré que pour des variétés à cycle court. L'utilisation de modèles écophysologiques est de plus en plus envisagée. Parmi ces modèles figure SARRA-H qui a été développé par une équipe de chercheurs du CIRAD et de centres de recherche en Afrique de l'ouest dont le CRA. En outre, SARRA-H est capable de simuler la phénologie des céréales traditionnelles africaines photopériodiques. Ces 2 principales raisons nous ont amené à faire le choix du modèle SARRA-H pour notre étude. Mais d'abord il a fallu le caler sur les principaux cultivars de mil au Sénégal.

La seconde partie de la thèse a été consacrée à caractériser le développement phénologique des principaux cultivars de mil au Sénégal et au paramétrage de leur sensibilité à la photopériode avec le modèle SARRA-H. Dans le Centre-nord et le Centre-sud du Sénégal, les agriculteurs cultivent principalement des variétés à cycle court (Souna, Thialack). Dans le Sud, en plus du Souna, les agriculteurs cultivent des variétés photopériodiques (Sanio) qui présentent l'avantage d'avoir une date de floraison quasiment fixe quelle que soit la date de semis. La plupart des variétés traditionnelles, qu'elles soient précoces ou tardives, sont plus ou moins photosensibles en fonction de la latitude. La sensibilité au photopériodisme des variétés a été correctement paramétrée sur SARRA-H. Par ailleurs, une méthodologie a été proposée pour déterminer le coefficient génétique de photopériodisme (P_{sens}) d'un site donné à partir d'une formule liant la latitude de ce site à la latitude du site de Bambey et au coefficient génétique déterminé pour Bambey. Ce résultat peut trouver une application opérationnelle en modélisation des cultures et ses applications dont la prévision agricole en ce sens que la simulation des rendements peut être effectuée sous différentes

latitudes, sans être obligé d'effectuer de nouvelles expérimentations pour le paramétrage de la phénologie, une fois que l'équation d'ajustement est établie.

La troisième partie a porté sur l'utilisation du modèle SARRA-H pour la prévision des rendements des villages où des parcelles d'agriculteurs ont été suivies. En plus de SARRA-H, nous avons utilisé un second modèle écophysiologique (CELSIUS) qui diffère de SARRA-H de par sa fonction d'élaboration de rendement, sa prise en compte de la densité de population et sa méthode de calage. Les 2 modèles ont été correctement calés, SARRA-H dans des conditions de station et CELSIUS à partir des données des parcelles des agriculteurs. Cependant, des écarts de rendement importants ont été constatés entre rendements simulés et rendements des agriculteurs des villages-années. Ces écarts sont dus au facteur fertilité du sol et éventuellement aux facteurs biotiques. L'option de faire baisser le coefficient de conversion de l'énergie en biomasse pour prendre en compte les conditions paysannes a permis de simuler de façon beaucoup plus acceptable les conditions paysannes. Mais cela fait disparaître la variabilité inter-annuelle et inter-sites. Les recherches doivent être poursuivies afin d'établir des règles permettant de corriger annuellement ces coefficients. En outre, l'effet des contraintes n'est pas dynamique dans la mesure où c'est le même niveau de contrainte qui s'applique à tous les stades de développement. C'est pourquoi nous avons envisagé l'utilisation d'un modèle complexe qui gère l'interaction eau fertilité de façon dynamique.

Dans la quatrième et dernière partie, l'apport d'un modèle complexe, en l'occurrence CERES-Millet, pour la prévision des rendements du mil a été évalué. CERES-Millet a été choisi parce qu'il a déjà fait l'objet d'utilisation dans le même but au Sahel et en plus, il dispose d'un module photopériodique et donc peut être calé sur les principaux cultivars traditionnels du Sahel. Malgré de multiples problèmes rencontrés dans la structure pour le paramétrage de la phénologie et de la croissance en biomasse, CERES-Millet a été correctement calé et validé en station pour le rendement en grain. Cependant son utilisation en condition paysanne n'a pas été satisfaisante dans la mesure où des écarts de rendement importants ont été constatés entre rendements simulés et rendements des agriculteurs. Nous avons donc choisi l'option de faire baisser le coefficient de fertilité (SLPF) afin de se rapprocher des conditions paysannes. Des valeurs de coefficients ont été déterminées pour chaque zone (BAS + H-C et BAN) et qui permettent de simuler de façon bien plus satisfaisante les rendements des villages-années.

L'approche de faire baisser, soit le coefficient de conversion de l'énergie en biomasse (SARRA-H et CELSIUS) ou le SLPF (CERES-Millet) a permis dans l'ensemble d'améliorer les résultats de prévision des villages de notre base, mais avec des résultats variables en fonction du modèle. Dans le BAN, la performance de CERES-Millet est meilleure que les 2 autres modèles, avec des valeurs

de RRMSE de 42%, 46% et 71% respectivement pour CERES-Millet, CELSIUS et SARRA-H. Dans le BAS+H-C, les modèles CERES-Millet (RRMSE = 29%) et CELSIUS (RRMSE = 28%) ont une meilleure performance que SARRA-H (RRMSE = 71%). Ainsi, CERES-Millet s'est avéré le plus performant des 3 modèles, mais avec une performance qui ne diffère pas grandement de celle de CELSIUS. Cependant, il ne peut être recommandé en l'état pour des opérations de prévisions au Sénégal. Il conviendrait d'explorer plus les modalités d'application des ajustements du SLPF en relation aux conditions édaphiques dans le but d'obtenir de bonnes prévisions.

En outre, il faudrait régler les nombreux problèmes qui ont été constatés avec CERES-Millet concernant le développement phénologique, la croissance des biomasses et la prise en compte de l'azote du sol.

Après cette étape, la constitution d'une cartographie des sols dédiée à l'utilisation de CERES-Millet pour la prévision agricole devra être envisagée. Ce travail peut se faire à partir d'une revue de littérature sur des études de sol au Sénégal ou à partir d'une base de données de sols comme celle de la WISE *database* de l'ISRIC. Par la suite, des valeurs de coefficient SLPF pourraient aussi être déterminées pour les différents types de sols qui seront identifiés.

Par ailleurs, CERES-Millet aura besoin d'être paramétré sur les principaux cultivars du Sénégal, en particulier sur les cultivars du Sud qui sont fortement photopériodiques. Pour cela, le problème lié aux limites du modèle pour la simulation de cultivars photopériodiques devra être résolu.

Références bibliographiques

- Abdulai, A., M. Kouressy, M. Vaksman, F. Asch, M. Giese et B. Holger. 2012. Latitude and date of sowing influences phenology of photoperiod-sensitive sorghums. *Journal of Agronomy and Crop Science* 198: 340–348.
- Affholder, F. 1994. Influence de la fertilisation et du contrôle de l'enherbement sur la réponse des rendements du mil pluvial à un indice hydrique synthétique, *In Bilan Hydrique Agricole et Sécheresse En Afrique Tropicale*. John Libbey Eurotext, Paris, France. p. 191–203.
- Affholder, F. 1997. Empirically modelling the interaction between intensification and climatic risk in semiarid regions. *Field Crops Research* 52: 79–93.
- Affholder, F. 2001. Modélisation de culture et diagnostic agronomique régional. Mise au point d'une méthode et application au cas du maïs chez les petits producteurs du Brésil Central. *Thèse de Doctorat*, Institut National Agronomique Paris-Grignon, Paris, France. 232 p.
- Affholder, F., C. Poeydebat, M. Corbeels, E. Scopel et P. Tittone. 2013. The yield gap of major food crops in family agriculture in the tropics: Assessment and analysis through field surveys and modelling. *Field Crops Research* 143: 106–118.
- Alagaraswamy, G. et J. Ritchie. 1991. Phasic development in CERES-Sorghum model, *In Predicting Crop Phenology*, Hodges T. (ed.), CRC Press. Boca Raton, Florida, USA. p. 143–152.
- Allen, R.G., L.S. Pereira, D. Raes et M. Smith. 1998. Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements, *Irrigation and drainage papers*. FAO, Rome, Italie. 328p.
- Aubert, G. 1963. La classification des sols. La classification pédologique française. *Cahiers ORSTOM, Série Pédologie* 3: 1–7.
- Bacci, M. 2005. Manuel de formation pour l'analyse, le suivi, la prévision et la communication des informations météorologique et climatique concernant la production agricole, la santé et la gestion de l'environnement (SASPreC). CNR-IBIMET, Firenze, Italie. 63p.
- Barbier, B. 1998. Induced innovation and land degradation: Results from a bioeconomic model of a village in West Africa. *Agricultural Economics* 19: 15–25.
- Baron, C. et F. Reyniers. 1999. Applications du logiciel SARRA à l'étude de risques climatiques. *Agriculture et Développement* 24: 89–97.
- Baron, C., B. Sultan, M. Balme, B. Sarr, S. Traoré, T. Lebel, S. Janicot et M. Dingkuhn. 2005. From GCM grid cell to agricultural plot: scale issues affecting modelling of climate impact. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 360: 2095–2108.
- Baron, C., B. Sultan, M. Dingkuhn, B. Muller, S.B. Traoré, A. Alhassane et M. Zouzou. 2009. Adaptation and evaluation of the SARRA-H crop model for agricultural yield forecasting in West Africa. *Third International AMMA Conference, July 20–24*, African Monsoon Multidisciplinary Analyses, Ouagadougou, Burkina Faso.
- Bationo, A. et A.U. Mokwunye. 1991. Alleviating soil fertility constraints to increased crop production in West Africa: The experience in the Sahel. *Fertilizer Research* 29: 95–115.
- Bechini, L., S. Bocchi, T. Maggiore et R. Confalonieri. 2006. Parameterization of a crop growth and development simulation model at sub-model components level. An example for winter wheat (*Triticum aestivum L.*). *Environmental Modelling and Software* 21: 1042–1054.
- Begué, A. 2002. Télédétection et production végétale. *Habilitation à Diriger des Recherches*, Université Pierre et Marie Curie, Paris, France. 109p.
- Binswanger, H.P. et D.A. Sillers. 1983. Risk aversion and credit constraints in farmers' decision-

- making: A reinterpretation. *Journal of Development Studies* 20: 5–21.
- Boling, A.A., T.P. Tuong, H. van Keulen, B.A.M. Bouman, H. Suganda et J.H.J. Spiertz. 2010. Yield gap of rainfed rice in farmers' fields in Central Java, Indonesia. *Agricultural Systems* 103: 307–315.
- Brisson, N. 2009. Principes et utilité des modèles de culture, *In Modélisation En Biologie Végétale*. Comptes rendus de l'Académie d'agriculture de France du 28 janvier 2009, Académie d'Agriculture de France, Paris, France. 4p.
- Brisson, N., C. Gary, E. Juste, R. Roche, B. Mary, D. Ripoche, D. Zimmer, J. Sierra, P. Bertuzzi, P. Burger, F. Bussièrè, Y.M. Cabidoche, P. Cellier, P. Debaeke, J.P. Gaudillère, F. Maraux, B. Seguin et H. Sinoquet. 2003. An overview of the crop model STICS. *European Journal of Agronomy* 18: 309–332.
- Brisson, N., B. Mary, D. Ripoche, M.H. Jeuffroy, F. Ruget, B. Nicoulaud, P. Gate, F. Devienne-Barret, R. Antonioletti, C. Durr, G. Richard, N. Beaudoin, S. Recous, X. Tayot, D. Plenet, P. Cellier, J.-M. Machet, J.M. Meynard et R. Delécolle. 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.
- Buerkert, A. et P. Hiernaux. 1998. Nutrients in the West African Sudano-Sahelian zone: Losses, transfers and role of external inputs. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* 161: 365–383.
- Bush, R. 2010. Food Riots : Poverty, Power and Protest. *Journal of Agrarian Change* 10: 119–129.
- Center for Disease Control. 1973. Nutritionnal surveillance in drought affected areas West Africa (Mali, Mauritania, Niger, Upper Volta)-August-September 1973. *Mimeographed reports No. 184*, Public Health Services, Atlanta, US. 37p.
- Chantereau, J., M. Vaksman, I. Bahmani, M. Hamada, M. Chartier et R. Bonhomme. 1997. Characterization of different temperature and photoperiod responses in African sorghum cultivars, *In Amélioration Du Sorgho et de Sa Culture En Afrique de L'ouest et Du Centre, Cirad*. Atelier de restitution du programme conjoint sur le sorgho, 17-20 mars 1997, Ratnadass A., Chantereau J., Gigou J. (eds.), Montpellier, France, Bamako, Mali. p. 29–35.
- Charreau, C. et R. Fauck. 1965. Les sols du Sénégal. *In Connaissance Du Sénégal: Climat, Sols, Végétation, Etudes Sénégalaises*. CRDS, Dakar, Sénégal. p 115-145.
- Charreau, C. et R. Nicou. 1971. L'amélioration du profil cultural dans les sols sableux et sablo-argileux de la zone tropicale sèche ouest-africaine et ses incidences agronomique, *Bulletin Agronomique - IRAT*. Dakar, Sénégal. 254p.
- Clerget, B. 2004. Le rôle du photopériodisme dans l'élaboration du rendement de trois variétés de sorgho cultivées en Afrique de l'Ouest. *Thèse de Doctorat*, Institut National Agronomique Paris-Grignon, Paris, France. 192p.
- Clerget, B., M. Dingkuhn, J. Chantereau, J. Hemberger, G. Louarn et M. Vaksman. 2004. Does panicle initiation in tropical sorghum depend on day-to-day change in photoperiod? *Field Crops Research* 88: 21–37.
- Cochemé, J. et P. Franquin. 1967. An agroclimatology survey of a semiarid area in Africa south of the Sahara, WMO. Rome, Italie. 136p.
- CSE. 2007. Caractérisation des systèmes de production agricole au Sénégal. *Document de synthèse*, Dakar, Sénégal. 38p.
- Curtis, D. 1968. The relation between the date of heading of Nigerian sorghums and the duration of the growing season. *Journal of Applied Ecology* 5: 215–226.

- Dagnélie, P. et R. Palm. 1993. Régression multiple et prévision de rendements agricoles en fonction de données météorologiques, *In Biométrie et Analyse Des Données Spatio-Temporelles*. Duby C., Boniface M., Asselin B. (eds.), Vannes, France. p. 50–57.
- Dancette, C. 1983. Besoins en eau du mil au Sénégal. Adaptation en zone semi-aride tropicale. *Agronomie Tropicale* 38: 267–280.
- De Rouw, A. 2004. Improving yields and reducing risks in pearl millet farming in the African Sahel. *Agricultural Systems* 81: 73–93.
- De Wit, C., R. Brouwer et F. Penning de Vries. 1970. The simulation of photosynthetic system, *In Prediction and Measurement of Photosynthetic Productivity*. Proceedings of the IBP/PP technical meeting, Třeboň, 14-21 September 1969, Pudoc, Wageningen, The Netherlands. 632.
- Di Vecchia, A., P. Vignaroli et B. Djaby. 2003. Les crises alimentaires et les systèmes de prévision au Sahel, *In Cours de Formation Sur Les Méthodologies, Les Produits et Les Applications À Développer Par L'emploi Du METEOSAT Deuxième Génération*. Réunion annuelle du Réseau de Prévention des Crises Alimentaires au Sahel, Bruxelles, décembre 2002, Agrhymet, CNR IBIMET, Bruxelles, Belgique. 8p.
- Diarra, B. et K. Konaré. 1994. Réduction de l'impact du climat sur le calendrier agricole au Sahel, *In Bilan Hydrique Agricole et Sécheresse En Afrique Tropicale: Vers Une Gestion Des Flux Hydriques Par Le Système de Culture*, Séminaire international, Bamako, 9-13 décembre 1991, Reyniers F.N., Netoyo L. (eds.), John Libbey Eurotext. Paris, France. p. 31–49.
- Dingkuhn, M., C. Baron, V. Bonnal, F. Maraux, B. Sarr, B. Sultan, A. Clopes et F. Forest. 2003. Decision support tools for rainfed crops in the Sahel at the plot and regional scales, *In Decision Support Tools for Smallholder Agriculture in Sub-Saharan Africa-A Practical Guide*. Struif Bontkes T.E., Wopereis M.C.S. (eds), CTA, IFDC Wageningen, The Netherlands. p. 127–139.
- Dingkuhn, M., M. Kouressy, M. Vaksman, B. Clerget et J. Chantereau. 2008. A model of sorghum photoperiodism using the concept of threshold-lowering during prolonged appetence. *European Journal of Agronomy* 28: 74–89.
- Diop, M., F.N. Reyniers et B. Sarr. 2005. Apport du photopériodisme à l'adaptation du mil à la sécheresse en milieu soudano-sahélien. *Sécheresse* 16: 35–40.
- Diouf, O. 2000. Réponses agrophysiologiques du mil (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.) à la sécheresse : influence de la nutrition azotée. *Thèse de Doctorat*, Université Libre de Bruxelles, Bruxelles. 160p.
- Diouf, O., Y.C. Brou, M. Diouf, B. Sarr, M. Eyletters, H. Roy-Macauley et J.P. Delhay. 2004. Response of Pearl Millet to nitrogen as affected by water deficit. *Agronomie* 24: 77–84.
- Direction de l'aménagement du territoire. 1999. Plan national d'aménagement du territoire. Ministère de l'économie des finances et du plan, Dakar, Sénégal. 31p.
- Doggett, H. 1984. Striga - its biology and control. An overview, *In Biology and Control of Striga, International Council of Scientific Unions*. Proceedings of the Workshop, Dakar, Senegal, 14-17 November 1983, Ayensu *et al.*, (eds), Paris, France. p. 203.
- Evans, L.T. 1993. Crop evolution, adaptation and yield. Cambridge University Press, Cambridge. 514p.
- FAO. 1975. Rapport du Conseil de la FAO-Soixante-cinquième session Rome, 10–14 mars 1975. *Rapport No. CL 65/REP*, FAO, Rome, Italie. 50p.
- FAO. 2000. Réunion technique sous-régionale sur les méthodes de prévision de récoltes des

- cultures vivrières, 15-16 mai 2000 à Bamako. *Rapport de synthèse*, FAO, Bamako, Mali. 116p.
- FAO. 2003. SMIAR-Système Mondial d'Information et d'Alerte Rapide sur l'alimentation et l'agriculture [*Brochure*].
- Fechter, J., B.E. Allison, M.V.K. Sivakumar, R.R.V.D. Ploeg et J. Bley. 1991. An evaluation of the SWATRER and CERES-Millet models for southwest Niger, *In Soil Water Balance in the Sudano-Sahelian Zone*, IAHS Publication 199. Proceedings of the Niamey Workshop, February 1991, Niamey, Niger, IAHS Press, Institute of Hydrology, Wallingford, United Kingdom. p. 505–513.
- Fleury, A. 1990. Méthodologie de l'analyse de l'élaboration du rendement, *In Physiologie et Production Du Maïs*. INRA, Pau, France. p. 279–290.
- Fofana, A. 1996. Amélioration variétale du mil. *Rapport analytique 1995*. ISRA, URR, Centre Nord Bassin Arachidier, Bambey, Sénégal. 22p.
- Folliard, A., P. Traoré, M. Vaksman et M. Kouressy. 2004. Modeling of sorghum response to photoperiod: a threshold–hyperbolic approach. *Field Crops Research* 89: 59–70.
- Forest, F. et B. Cortier. 1991. Diagnostic hydrique des cultures et la prévision du rendement régional du mil cultivé dans les pays du CILSS, *In Soil Water Balance in the Sudano-Sahelian Zone*, IAHS Publication 199. Proceedings of an International Workshop, 18- 23 February , 1991, Niamey, Niger, IAHS Press, Institute of Hydrology, Wallingford, United Kingdom. p. 547–559.
- Franquin, P. 1974. Formulation des phénomènes apparents de photothermopériodisme en conditions naturelles. Principes de base. *Cahiers ORSTOM, Série Biologie* 23: 31–43.
- Frère, M. et G. Popov. 1987. Suivi agrométéorologique des cultures et prévision des rendements. FAO, Rome, Italie. 41p.
- Garcia-Huidobro, J., J. Monteith et G. Squire. 1982. Time, temperature and germination of Pearl Millet (*Pennisetum typhoides* S. et H.) I. Constant temperature. *Journal of Experimental Botany*. 33: 288–296.
- Genovese, G. 1997. Prévision des rendements et méthodes opérationnelles utilisant la télédétection: Aperçu des méthodes et des applications opérationnelles en 1994 dans l'Union Européenne, *In Méthodes de Prévision de Rendements Agricoles*. Actes du séminaire de Villefranche-sur-Mer, du 24 au 27 octobre 1994, CECA-CE-CEEA, Bruxelles, Luxembourg. p. 79–86.
- Gijssman, A.J., G. Hoogenboom, W.J. Parton et P.C. Kerridge. 2002. Modifying DSSAT Crop Models for Low-Input Agricultural Systems Using a Soil Organic Matter–Residue Module from CENTURY. *Agronomy Journal* 94: 462–474.
- Godwin, D.C. et C.A. Jones. 1991. Nitrogen Dynamics in Soil-Plant Systems, *In Modeling Plant and Soil Systems*. Hanks J., Ritchie J.T. (eds.). p. 287–321.
- Gozé, E. 1990. Modèle stochastique de la pluviométrie au Sahel. Application à l'agronomie. Générateur des pluies. *Thèse de Doctorat*, Université de Montpellier II, Montpellier, France. 228p.
- Groten, S.M.E. 1993. NDVI—crop monitoring and early yield assessment of Burkina Faso. *International Journal of Remote Sensing* 14: 1495–1515.
- Hallstrom, D.G. 2004. Interannual Climate Variation, Climate Prediction, and Agricultural Trade: the Costs of Surprise versus Variability. *Review of International Economics* 12: 441–455.
- Hammer, G. et R. Muchow. 1994. Assessing climatic risk to sorghum production in water-limited subtropical environments I. Development and testing of a simulation model. *Field Crops*

Research 36: 221–234.

- Hamon, G. 1980. Mise en œuvre et critique de méthodes de caractérisation hydrodynamique de la zone non saturée du sol. Application aux sols de culture du Sénégal. *Thèse de Doctorat-Ingénieur*, Institut de mécanique de Grenoble, Grenoble, France. 136p.
- Hansen, J.W. 2005. Integrating seasonal climate prediction and agricultural models for insights into agricultural practice. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 360: 2037–2047.
- IBM Corp. 2012. IBM SPSS Statistics for Windows. IBM Corp., Armonk, NY (USA).
- IBSNAT. 1990. IBSNAT progress report 1987-1990. International Benchmark Site Network for Agrotechnology Transfer, Honolulu, USA. 54p.
- Imbernon, J. 1981. Variabilité spatiale des caractéristiques hydrodynamiques d'un sol du Sénégal. Application au calcul d'un bilan sous culture. *Thèse de doctorat 3ème cycle*, Université scientifique et médicale et INP, Grénoble, France. 125p.
- Jagtap, S.S., F.J. Abamu et J.G. Kling. 1999. Long-term assessment of nitrogen and variety technologies on attainable maize yields in Nigeria using CERES-Maize. *Agricultural Systems* 60: 77–86.
- Janin, P. 2009. Les émeutes de la faim : une lecture (géo-politique) du changement (social). *Politique Etrangère*, IFPRI 251–263.
- Jones, J. et J. Luyten. 1988. Simulation of biological processes, *In Agricultural Systems Modeling and Simulation*. Peart, R.M. and Curry, R.B. (eds), New York, USA. p. 728.
- Jones, J., G. Hoogenboom, C. Porter, K. Boote, W. Batchelor, L. Hunt, P. Wilkens, U. Singh, A. Gijssman et J. Ritchie. 2003. The DSSAT cropping system model. *European Journal of Agronomy* 18: 235–265.
- Keating, B., P. Carberry, G. Hammer, M. Probert, M. Robertson, D. Holzworth, N. Huth, J.N. Hargreaves, H. Meinke, Z. Hochman, G. McLean, K. Verburg, V. Snow, J. Dimes, M. Silburn, E. Wang, S. Brown, K. Bristow, S. Asseng, S. Chapman, R. McCown, D. Freebairn et C. Smith. 2003. An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation. *European Journal of Agronomy* 18: 267–288.
- Kerr, Y.H., J.P. Lagouarde et J. Imbernon. 1992. Accurate land surface temperature retrieval from AVHRR data with use of an improved split window algorithm. *Remote Sensing of Environment* 41: 197–209.
- Khouma, M. 2002. Les grands types de sols du Sénégal, *Rapport de la quatorzième réunion du sous-comité ouest et centre africain de corrélation des sols pour la mise en valeur des terres*, Abomey, Bénin, 9-13 octobre 2000, FAO, Rome, Italie. p. 77–94.
- Kouakou, P.K. 2009. Calage du modèle SARRA-H sur des variétés de mil (*Pennisetum spp.*) et confrontation du modèle à la réalité paysanne de la région de Diourbel (Sénégal). *Mémoire de DEA*, Université Cheikh Anta Diop de Dakar, Dakar, Sénégal. 60p.
- Kouressy, M., M. Dingkuhn, M. Vaksman et A. Heinemann. 2008. Adaptation to diverse semi-arid environments of sorghum genotypes having different plant type and sensitivity to photoperiod. *Agricultural and Forest Meteorology* 148: 357–371.
- Kouressy, M., S. Traore, M. Vaksman, M. Grum, I. Maikano, M. Soumare, P. Traore, D. Bazile, M. Dingkuhn et A. Sidibé. 2008. Adaptation des sorghos du Mali a la variabilité climatique. *Cahiers Agricultures* 17: 95–100.
- Lalau-Keraly, A. 1991. Panorama des systèmes d'information sur la sécurité alimentaire dans les neuf pays du CILSS. *Stateco* 66: 77–104.

- Le Barbé, L., T. Lebel et D. Tapsoba. 2002. Rainfall variability in West Africa during the years 1950–90. *Journal of Climate* 15: 187–202.
- Lobell, D.B., K.G. Cassman et C.B. Field. 2009. Crop Yield Gaps: Their Importance, Magnitudes, and Causes. *Annual Review of Environment and Resources* 34: 179–204.
- Major, D. 1980. Photoperiod response characteristics controlling flowering of nine crop species. *Canadian Journal of Plant Science* 60: 777–784.
- Manu, A., A. Bationo et S.C. Geiger. 1991. Fertility status of selected millet producing soils of West africa with emphasis on phosphorus. *Soil Science* 152: 315–320.
- Maselli, F., C. Conese, L. Petkov et M.-A. Gilabert. 1992. Use of NOAA-AVHRR NDVI data for environmental monitoring and crop forecasting in the Sahel. Preliminary results. *International Journal of Remote Sensing* 13: 2743–2749.
- Ministère de l'Économie et des Finances du Sénégal. 2011. Rapport national sur la compétitivité du Sénégal 2011. Dakar, Sénégal. 98p.
- Mishra, A., J.W. Hansen, M. Dingkuhn, C. Baron, S.B. Traoré, O. Ndiaye et M.N. Ward. 2008. Sorghum yield prediction from seasonal rainfall forecasts in Burkina Faso. *Agricultural and Forest Meteorology* 148: 1798–1814.
- Monteith, J. 1984. On time and crop production. *Jennareddy Venkat Reddy Memorial lecture*, 10 December 1984, ICRISAT, Andhra Pradesh Agricultural University, India.
- Moussa, M.M. 2005. Application des méthodes d'évaluation de rendements agricoles à l'aide des images NDVI. *Rapport de consultation*, CILSS, Niamey, Niger. 48p.
- Mueller, N.D., J.S. Gerber, M. Johnston, D.K. Ray, N. Ramankutty et J.A. Foley. 2012. Closing yield gaps through nutrient and water management. *Nature* 490: 254–257.
- Muller, B., A. Alhassane, S.B. Traoré, M. Kouressy, L. Somé, M. Vaksman et C. Baron. 2009. Farmers yield variability assessment and validation of crop model to predict "average regional" farmers yield for the main cropped varieties of millet, sorghum and maize ". *livrable D 3.1 gf , WP 3.1: Land Productivity, projet AMMA, Thematic priority: 1.1.6.3 Global change and Ecosystems No. D 3.1 gf*, CIRAD, AMMA, CILSS, Montpellier, France. 65p.
- Naab, J.B., P. Singh, K.J. Boote, J.W. Jones et K.O. Marfo. 2004. Using the CROPGRO-Peanut Model to Quantify Yield Gaps of Peanut in the Guinean Savanna Zone of Ghana. *Agronomy Journal* 96: 1231–1242.
- Ndiaye, M. et M. Niang. 2010. De l'étude sur la transmission des fluctuations et le calcul de prix de parité à l'importation/exportation dans la sous-région: Cas pratique du Sénégal. *Rapport final*, CSA-SIM, Dakar, Sénégal. 50p.
- Ndong, J.-B. 1995. L'évolution de la pluviométrie au Sénégal et les incidences de la sécheresse récente sur l'environnement. *Revue de géographie de Lyon* 70: 193–198.
- Ndoye, M., R.T. Gahukar, A.G. Carson, C.J. Selvara, D.F. Mbaye et S. Diallo. 1984. Les problèmes phytosanitaires du mil dans le Sahel. In *Compte Rendu Du Séminaire International Du Projet CILSS de Lutte Intégrée*, Niamey (Niger), 6-13 Décembre 1984. CNRA, Bambey, Sénégal. p 79-94.
- Niane Badiane, A., M. Khouma et M. Sène. 2000. Région de Diourbel: Gestion des sols. *Dryland research working paper No. 15*, Drylands Research, Crewkerne Somerset TA18 8BJ Royaume-Uni. 33p.
- Olivier, A. 1995. Le striga, mauvaise herbe parasite des céréales africaines : biologie et méthodes de lutte. *Agronomie* 15: 517–525.

- Ouaidrari, H. 1994. Utilisation des données NOAA-AVHRR pour modéliser la production primaire du mil dans l'écosystème sahélien (Niger). *Thèse de Doctorat*, Université de Paris 07, Paris, France. 210p.
- Parton, W.J., J.W.B. Stewart et C.V. Cole. 1988. Dynamics of C, N, P and S in grassland soils: a model. *Biogeochemistry* 5: 109–131.
- Pellissier, P. 1966. Les paysans du Sénégal. Les civilisations agraires du Cayor à la Casamance. Imprimerie Fabrègue, Saint-Yrieix, France. 939p.
- Penning de Vries, F., D. Jansen, H. ten Berge et A. Bakema. 1989. Simulation of Ecophysiological Processes of Growth in Several Annual Crops. Wageningen, The Netherlands.
- Penning de Vries, F.W.T. et R. Rabbinge. 1995. Models in research and education, planning and practice, *In Potato Ecology and Modelling of Crops under Conditions Limiting Growth*. Haverkort A.J., Donald K.L. (eds), Dordrecht, The Netherlands. p 1-18.
- Pieri, C. 1989. Fertilité des terres de savanes: bilan de trente ans de recherche et de développement agricoles au sud du Sahara. IRAT/CIRAD. 460p.
- Poeydebat, C., A. Ricome et F. Affholder. 2013. Simulation du rendement des cultures et modélisation bioéconomique pour la représentation des choix techniques des agriculteurs du bassin arachidier au Sénégal. CIRAD, Montpellier, France. 71p.
- Pol, F. V. D. et B. Traore. 1993. Soil nutrient depletion by agricultural production in Southern Mali. *Fertilizer Research* 36: 79–90.
- Ramaswamy, S. et J.H. Sanders. 1992. Population pressure, land degradation and sustainable agricultural technologies in the Sahel. *Agricultural Systems* 40: 361–378.
- Rashid, A. 2009. Global information and early warning system on food and agriculture (GIEWS), *In Integrated Global Models of Sustainable Development*. Akira Onishi, Oxford. 235p.
- Rasmussen, M.S. 1997. Operational yield forecast using AVHRR NDVI data: Reduction of environmental and inter-annual variability. *International Journal of Remote Sensing* 18: 1059–1077.
- Regmi, A., J. Ladha, H. Pathak, E. Pasuquin, C. Bueno, D. Dawe, P. Hobbs, D. Joshy, L. Maskey et S. Pandey. 2002. Yield and Soil Fertility Trends in a 20-Year Rice–Rice–Wheat Experiment in Nepal. *Soil Science Society of America Journal* 66: 857–867.
- Reyniers, F. 1998. Présentation du projet DHMC et des objectifs du séminaire final : pour une approche écosystémique de l'amélioration des écotypes locaux de sorgho et de mil, *In Le Futur Des Céréales Photopériodiques Pour Une Production Durable En Afrique Tropicale Semi-Aride*. Actes du séminaire final, 27-30 avril 1998, Florence, Bacci L., Reyniers F.N. (eds.), Cesia Florence, Cirad Montpellier. p. 21–28.
- Reyniers, F., V. Waneukeum, M. Vaksman et M. Kouressy. 1998. Effet de la latitude sur le ratio grain/paille des écotypes de mil au Mali : conséquences pour la sélection, p. 79–93. *In Le Futur Des Céréales Photopériodiques Pour Une Production Durable En Afrique Tropicale Semi-Aride*. Actes du séminaire final, 27-30 avril 1998, Florence, Bacci L., Reyniers F.N. (eds.), Cesia Florence, Cirad Montpellier.
- Ritchie, J.T. 1998. Soil water balance and plant water stress, *In Understanding Options for Agricultural Production*. Tsuji G.Y., Hoogenboom G., Thornton P.K. (eds.). Springer, Dordrecht, The Netherlands. p. 41–54.
- Salack, S., B. Muller et A.T. Gaye. 2011. Rain-based factors of high agricultural impacts over Senegal. Part I: integration of local to sub-regional trends and variability. *Theoretical and Applied Climatology* 106: 1–22.

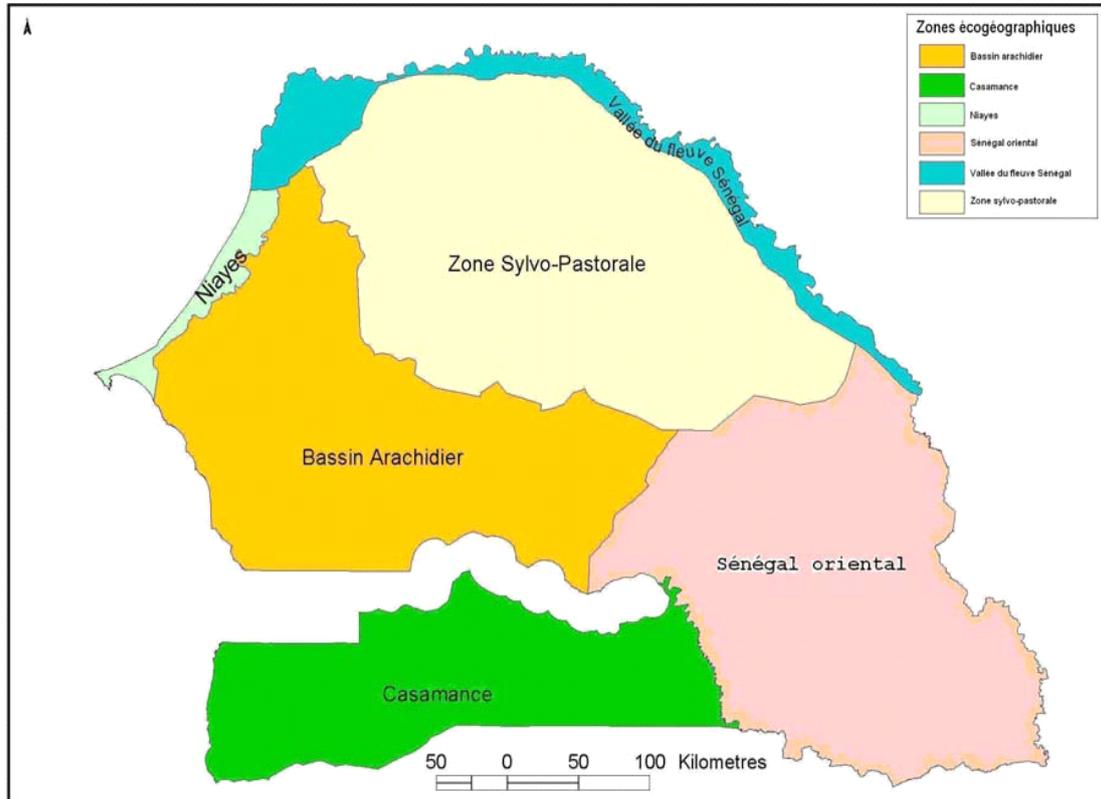
- Samba, A. 1998. Les logiciels DHC de diagnostic hydrique des cultures. Prédiction des rendements du mil en zones soudano-sahélienne de l'Afrique de l'Ouest. *Sécheresse* 9: 281–288.
- Samba, A., B. Sarr, C. Baron, E. Gozé, F. Maraux, B. Clerget et M. Dingkuhn. 2001. La prédiction agricole à l'échelle du Sahel, *In Modélisation Des Agrosystèmes et Aide À La Décision*. Malezieux E., Trebreil G., Jaeger M. (eds.), CIRAD-INRA. p. 243–261.
- Sarr, B., C. Baron, O. Diouf, M. Dingkuhn, S. Braconnier, I. Dieng, M. Fall et C. Sylla. 2004. Modélisation de la croissance et de la productivité des cultures céréalières, mise au point d'un SIG pour l'amélioration des systèmes de prévisions agricoles au Sénégal. *Rapport technique final No. 17*, Ceraas-Cirad, Sénégal. 65p.
- Scheuring, J. 1996. The dilemma of daylength, *In Lost Crops of Africa*, National Research Council. Washington. 54p.
- Seaman, J., P. Clarke, T. Boudreau et J. Holt. 2000. The Household Economy Approach. A resource manual for practitioners. Save the Children, London, United Kingdom. 166p.
- Siéné, L., B. Muller et S. Aké. 2010a. Effet de la densité de semis sur l'évolution du coefficient d'extinction de la lumière et de l'efficacité de conversion du rayonnement absorbé par le couvert végétal de deux variétés de mil de longueur de cycle différente. *International Journal of Biological and Chemical Sciences* 4: 1462–1479.
- Siéné, L., B. Muller et S. Aké. 2010b. Etude du développement et de la répartition de la biomasse chez deux variétés de mil de longueur de cycle différente sous trois densités de semis. *Journal of Applied Biosciences* 2260 – 2278.
- Sinclair, T.R. et N.G. Seligman. 1996. Crop Modeling: From Infancy to Maturity. *Agronomy Journal* 88: 698–704.
- Singh, P., K.J. Boote, A. Yogeswara Rao, M.R. Iruthayaraj, A.M. Sheikh, S.S. Hundal, R.S. Narang et P. Singh. 1994. Evaluation of the groundnut model PNUTGRO for crop response to water availability, sowing dates, and seasons. *Field Crops Research* 39: 147–162.
- Singh, P., S. Nedumaran, P.C.S. Traore, K.J. Boote, N.P. Singh, K. Srinivasa et M.C.S. Bantilan. 2013. Potential benefits of drought and heat tolerance and yield enhancing traits in Sorghum with climate change at selected sites in India and West. *Monograph*, ICRISAT, Patancheru, Andhra Pradesh, India. 28p.
- Sivakumar, M.V.K. 1988. Predicting rainy season potential from the onset of rains in southern sahelian and soudanian climatic zones of West Africa. *Agricultural and Forest Meteorology* 42: 295–305.
- Smith, P. 2001. Établissement de correspondance entre le fonctionnement physiologique de la canne à sucre et les concepts du modèle STICS. Calibration des modules de développement, de croissance aérienne, d'élaboration du rendement et de la qualité pour la variété R570. *Mémoire de M.Sc.*, ENSA Rennes, Rennes, Montpellier. 63p.
- Smithson, P.C. et K.E. Giller. 2002. Appropriate farm management practices for alleviating N and P deficiencies in low-nutrient soils of the tropics. *Plant and Soil* 245: 169–180.
- Soil Conservations Service. 1972. National Engineering Handbook. *In Hydrology Section 4*. USDA, Washington, USA. 762p.
- Spencer, D. et M. Sivakumar. 1987. Pearl Millet in African Agriculture, *Proceedings of International Pearl Millet Workshop, 7-11 avril 1986*, ICRISAT, Patancheru, India. p. 19–31.
- Sultan, B., C. Baron, M. Dingkuhn, B. Sarr et S. Janicot. 2005a. Agricultural impacts of large-scale variability of the West African monsoon. *Agricultural and Forest Meteorology* 128: 93–110.

- Sultan, B., C. Baron, M. Dingkuhn, B. Sarr et S. Janicot. 2005b. La variabilité climatique en Afrique de l'Ouest aux échelles saisonnière et intra-saisonnière. II : applications à la sensibilité des rendements agricoles au Sahel. *Sécheresse* 16: 23–33.
- Sultan, B., M. Bella-Medjo, A. Berg, P. Quirion et S. Janicot. 2010. Multi-scales and multi-sites analyses of the role of rainfall in cotton yields in West Africa. *International Journal of Climatology* 30: 58–71.
- Sultan, B., S. Janicot, C. Baron, M. Dinakuhn, B. Muller, S. Traore et B. Sarr. 2008. Les impacts agronomiques du climat en Afrique de l'Ouest : une illustration des problèmes majeurs. *Sécheresse* 19: 29–37.
- Teme, B., H. Breman et K. Sissoko. 1996. Intensification Agricole au Sahel : Mythe ou Réalité ? *Rapport de Synthèse des Travaux du Colloque International Bamako, 28 Novembre - 2 Décembre 1995*, PSS, Wageningen. 28p.
- Thornton, P.K., W.T. Bowen, A.C. Ravelo, P.W. Wilkens, G. Farmer, J. Brock et J.E. Brink. 1997. Estimating millet production for famine early warning: an application of crop simulation modelling using satellite and ground-based data in Burkina Faso. *Agricultural and Forest Meteorology* 83: 95–112.
- Tittonell, P. et K.E. Giller. 2013. When yield gaps are poverty traps: The paradigm of ecological intensification in African smallholder agriculture. *Field Crops Research* 143: 76–90.
- Traoré, S., A. Alhassane, B. Muller, M. Kouressy, L. Somé, B. Sultan, P. Oettli, L. Siéné, S. Sangaré, M. Vaksmann, M. Diop, M. Dingkuhn et C. Baron. 2011. Characterizing and modeling the diversity of cropping situations under climatic constraints in West Africa. *Atmospheric Science Letters* 12: 89–95.
- Traoré, S., F. Reyniers, M. Vaksmann, B. Kone, A. Sidibé, A. Yorote, K. Yattara et M. Kouressy. 2000. Adaptation à la sécheresse des écotypes locaux de sorghos du Mali. *Sécheresse* 11: 227–237.
- Trouche, G., J. Chantereau et J. Zongo. 1998. Variétés traditionnelles et variétés améliorées de sorgho dans les régions sahéennes, *In Le Futur Des Céréales Photopériodiques Pour Une Production Durable En Afrique Tropicale Semi-Aride*. Actes du séminaire final du Projet STD3 TS3 93.0223 “Risques et intensification : le diagnostic hydrique et minéral des céréales dans les pays sahéens et les zones communautaires du Zimbabwe” : 27-30 avril 1998, Bacci L., Reyniers F.N. (eds.), Cesia, Florence (Italie), Cirad, Montpellier (France). 270p.
- U.S. Census Bureau et ICF International. 2013. Census and Survey Processing System (CSPro). U.S. Census Bureau, Washington, DC (USA).
- USAID. 2013. Famine Early Warning Systems Network. About FEWS NET. *URL* <http://www.fews.net/ml/fr/info/Pages/why.aspx>. Visité le 8 février 2013
- Vaksmann, M., S. Traoré, M. Kouressy, H. Coulibaly et F. Reyniers. 1998. Etude du développement d'un sorgho photopériodique du Mali, *In Le Futur Des Céréales Photopériodiques Pour Une Production Durable En Afrique Semi-Aride*. Actes du séminaire international, 27-30 Avril 1998, Bacci L., Reyniers F.N. (eds.), Cesia, Florence (Italie), Cirad, Montpellier (France). p. 109–122.
- Vaksmann, M., S. Traore et O. Niangado. 1996. Le photopériodisme des sorghos africains. *Agriculture et Développement* 9: 13–18.
- Van Ittersum, M., P. Leffelaar, H. van Keulen, M. Kropff, L. Bastiaans et J. Goudriaan. 2003. On approaches and applications of the Wageningen crop models. *European Journal of Agronomy* 18: 201–234.

- Van Ittersum, M.K., K.G. Cassman, P. Grassini, J. Wolf, P. Tittone et Z. Hochman. 2013. Yield gap analysis with local to global relevance—A review. *Field Crops Research* 143: 4–17.
- Van Oosterom, E., P. Carberry, J. Hargreaves et G. O’Leary. 2001. Simulating growth, development, and yield of tillering pearl millet: II. Simulation of canopy development. *Field Crops Research* 72: 67–91.
- Wade, I. et O. Kamara. 2007. Formation de Formateurs et de producteurs sur la lutte intégrée durable contre Striga au Sénégal, *In Progress on Farmers Training on Parasitic Weed Management*. Ricardo Labrada, FAO, Rome. p. 129–138.
- Webb, R.A. 1972. Use of the boundary line in the analysis of biological data. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology* 47: 309–320.
- Williams, J., C. Jones et P. Dyke. 1984. A modeling approach to determining the relationship between erosion and soil productivity. *Transactions of the ASABE* 27: 0129–0144.
- Willmott, C. 1982. Some Comments on the Evaluation of Model Performance. *Bulletin of the American Meteorological Society* 63: 1309–1369.
- Willmott, C.J., S.M. Robeson et K. Matsuura. 2012. A refined index of model performance. *International Journal of Climatology* 32: 2088–2094.
- Willmott, C.J. et D.E. Wicks. 1980. An Empirical Method for the Spatial Interpolation of Monthly Precipitation within California. *Physical Geography* 1: 59–73.

Annexes

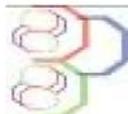
Annexe 1 : Cartes des zones écogéographiques du Sénégal



Annexe 2 : Article publié dans le cadre de la thèse

(Disponible en ligne à l'adresse : <http://www.m.elewa.org/JABS/2013/67/12.pdf>)

Kouakou et al *J. Appl. Biosci.* 2013. Étude et prise compte en modélisation de l'effet de la latitude sur la réponse à la photopériode chez divers génotypes de mil du Sénégal



Journal of Applied Biosciences 67:5289 – 5301

ISSN 1997–5902

Étude et prise en compte en modélisation de l'effet de la latitude sur la réponse à la photopériode chez divers génotypes de mil (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.) du Sénégal

Kouakou^{1,2,4} PK, Muller^{1,3,6} B, Guissé² A, Yao⁴ RN, Fofana⁵ A, Cissé¹ N

¹ CERAAS-ISRA, BP 3320 Thiès Escalé, Sénégal

² UCAD, Avenue Cheikh Anta Diop, BP 5005 Dakar, Sénégal

³ CIRAD, Umr Agap, F-34398 Montpellier, France

⁴ INP-HB, BP 1093 Yamoussoukro, Côte d'Ivoire

⁵ CNRA-ISRA, BP 53 Bambey, Sénégal

⁶ AfricaRice, Station Régionale du Sahel, BP 96 Saint-Louis, Sénégal

Adresse du principal auteur : patrice.kouakou@inphb.edu.ci

Original submitted in on 16th April 2013 Published online at www.m.elewa.org on 30th July 2013.

RESUME

Objectif : L'étude a porté sur la caractérisation des variations de cycles de différents génotypes de mil cultivés au Sénégal sous différentes latitudes et l'amélioration de la modélisation de leur réponse à la photopériode.

Méthodologie et résultat : Des essais à plusieurs dates de semis (12 juin, 10 juillet et 08 août) ont été conduits en 2012 sur 3 sites (Ndiol, Bambey et Kolda) au Sénégal dans un dispositif en blocs complets randomisés à 3 répétitions, et sous de bonnes conditions d'alimentation hydrique et de fertilité. Le matériel végétal était composé de 2 variétés améliorées, de type Souna, et de 6 écotypes locaux dont 2 de type Souna et 4 de type Sanio, qui ont été collectés suivant un gradient latitudinal nord-sud en mai 2011. Une caractérisation des durées semis-feuille drapeau de ces génotypes a été faite en fonction des dates de semis et de la latitude. Le modèle Impatience a été paramétré puis utilisé pour simuler les dates d'initiation paniculaire sur les sites. Les résultats ont montré que les durées semis-feuille drapeau diminuaient avec les semis tardifs et augmentaient avec la latitude, avec une différence entre sites plus marquée pour les semis précoces. Le paramétrage du modèle Impatience obtenu à Bambey ne permettait pas de simuler correctement les durées de la phase végétative à Ndiol et à Kolda. Une équation de correction a été proposée pour estimer les paramètres du modèle à Ndiol et à Kolda en prenant en compte les latitudes de ces sites et le paramétrage du modèle à Bambey. Cette procédure a permis de simuler correctement les dates d'initiation paniculaire de ces sites avec des valeurs de RMSE proches de celles obtenues si le paramétrage spécifique de chacun de ces sites était utilisé.

Conclusion et application : Cette étude a permis de montrer que la plupart des variétés traditionnelles, précoces comme tardives, sont plus ou moins photosensibles. La méthode de correction du Psens proposée a permis d'améliorer les performances du modèle. Ce résultat trouve une application opérationnelle en modélisation des cultures et ses applications dont la prévision agricole.

Mots clés : Latitude, Photopériode, Modélisation, *Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.), Modèle SarraH, Sénégal

Annexe 3 : Liste des équations

$IRESP = \frac{ETR}{ETM} \text{ cycle de croissance} * \frac{ETR}{ETM} \text{ période critique}$	30
$\text{Rendement grains (kg. ha}^{-1}\text{)} = 11,3 * IRESP - 128$	30
$NDVI = \frac{PIR-R}{PIR+R}$	31
$SDD = \sum_{j=1}^{j=n} (Ts - Ta)$	31
$Kp = \frac{SFD1-SFD2}{DS2-DS1}$	40
$(\frac{1000}{\sum_{i=BVP} dtti} Pexp) \frac{Pi-Pbase}{Psat-Pbase} \geq Psens$	41
$RRMSE = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Pi-Oi)^2}}{\bar{o}}$	41
$PsensSite = 1,2468 * PsensBambey - 0,0120 * PsensBambey * LatSite - 0,0148$	46
$BiomasseTotale = 0,5 * RG * (1 - LTR) * \epsilon b * 10 * \frac{Tr}{TrPot} - RespMaint$	58
$RdtPot = KRdtA * (BiomTotaleStadeFloraison - BiomTotaleStadeIP) + KRdtB$	58
$GRO = (\epsilon bmax * RAIN T - 0,0815 * RAIN T^2) * F(T)$	58
$Ngrain = Cgrain * VitMoy + Cgrainv0$	59
$RRMSE = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Pi-Oi)^2}}{\bar{o}}$	59
$IA = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Pi-Oi)^2}{\sum_{i=1}^n (Pi-\bar{o} + Oi-\bar{o})^2}$	59
$RRMSE = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Pi-Oi)^2}}{\bar{o}}$	82
$IA = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Pi-Oi)^2}{\sum_{i=1}^n (Pi-\bar{o} + Oi-\bar{o})^2}$	82

Auteur : Patrice Koffi KOUAKOU

Résumé

La thèse a pour objectif de contribuer à améliorer la prévision des rendements du mil au Sénégal par l'utilisation de modèles de culture. Deux modèles écophysologiques à base bilan hydrique (SARRA-H et CELSIUS) ont d'abord été calés et validés sur les principaux cultivars du Sénégal (Souna, Sanio, Thialack), dont la plupart sont photopériodiques. Des écarts importants entre rendements simulés et rendements des agriculteurs ont été observés dans l'utilisation de ces modèles pour la prévision en condition paysanne. L'analyse des écarts de rendement a révélé que ces écarts étaient dus en partie au faible niveau de fertilité des parcelles paysannes. Un modèle plus complexe, CERES-Millet, capable de gérer en plus l'interaction eau-fertilité, a donc été utilisé dans un second temps. Malgré de nombreux problèmes liés au calage de la biomasse et du développement de la surface foliaire, il a été correctement calé et validé en station sur le rendement en grain. Cependant, des écarts importants entre rendements simulés et rendements des agriculteurs subsistaient en condition paysanne. L'option de prendre en compte le faible niveau de fertilité des parcelles, à travers la baisse du facteur de fertilité (SLPF) de CERES-Millet, a permis d'obtenir des résultats acceptables et meilleurs que ceux obtenus en faisant baisser dans le même but le coefficient de conversion de l'énergie en biomasse de SARRA-H et de CELSIUS. Cependant, il conviendrait d'améliorer le fonctionnement de CERES-Millet et de poursuivre l'exploration des modalités d'ajustement du coefficient SLPF en fonction des conditions édaphiques en vue de bonnes prévisions.

Pearl millet (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.) yield forecasting improvement with crop models considering varieties' sensibility to photoperiod and fertility in farmers' fields in Senegal

Abstract

This thesis aims to improve pearl millet yield forecasting by using crop models. Two water-balance ecophysiological models (SARRA-H and CELSIUS) were first calibrated and validated on the main pearl millet cultivars (Souna, Sanio, Thialack) of Senegal, of which most are photosensitive. But important yield gaps were observed between simulated yields and observed ones when the model was used under farmers' fields conditions. The yield gaps analysis revealed that low fertility levels of farmers' fields are responsible for the gaps. In order to reduce yield gaps, CERES-Millet which is a more complex model able to simulate water-nitrogen interaction, was then used. Despite several problems with the calibration of biomass and leaf area, the calibration of grain yield was satisfactory. CERES-Millet, was correctly calibrated and validated in research station conditions for the grain yield. However, important yield gaps were also observed when using it for farmers' fields conditions. We decided to reduce the fertility factor (SLPF) of CERES-Millet to take into account the low fertility levels of farmer's fields. This approach permitted us to obtain satisfactory simulations, better than what we obtained by reducing empirically the conversion coefficient of intercepted radiation to biomass for SARRA-H and CELSIUS. Yet, in order to obtain accurate yields forecasts, it appears necessary to improve the functioning of CERES-Millet and to study the options of how to adjust the coefficients SLPF.

Spécialité: Production et Protection des végétaux

Mots-clés : Modèle de culture, Photopériodisme, Prévision des rendements, Écarts de rendement, *Pennisetum glaucum* (L.) R. Br., Sénégal.

CERAAS, Km 7,5 Route de Khombole. BP 3320 Thiès Ecalle, Sénégal.