

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 : 2017

N° d'ordre : 015



THESE UNIQUE DE DOCTORAT

**En Biologie, Physiologie et Pathologies végétales
Spécialité : Production et Protection des végétaux**

Présentée par :

Kouadio Paul-Martial KOUAKOU

**Evaluation des possibilités de culture du riz
pluvial et risques climatiques associés au Sénégal**

Soutenue le 20 mars 2017 devant le jury composé de :

Président : Kandioura NOBA, Professeur titulaire (FST/UCAD, Sénégal)

Rapporteurs : Diégane DIOUF, Maître de conférences (FST/UCAD, Sénégal)

M'Baye DIOP, Maître de recherches (ISRA/CNRA Bambey, Sénégal)

Mamadou Kabirou N'DIAYE, Directeur de recherches (AfricaRice)

Examineur : Bertrand MULLER, Chercheur (CIRAD, France)

Directeur de thèse : Aliou GUISSSE, Professeur titulaire (FST/UCAD, Sénégal)

A

*Ahou Blandine,
Mon aide semblable.*

*A Danielle, Elielle et Prunelle,
Miracles tangibles de l'indéfectible
Providence divine.*

*Aux Précieux cadets des « Triplettes »
La symphonie aurait été inachevée sans vous.*

« J'ai encore vu sous le soleil que la course n'est point aux agiles ni la guerre aux vaillants, ni le pain aux sages, ni la richesse aux intelligents, ni la faveur aux savants; car tout dépend pour eux du temps et des circonstances ».

Ecclésiaste 9 verset 11 (La Sainte Bible version Louis Segond)

Avant-propos

Le présent document est l'aboutissement d'un processus qui a vu la contribution de plusieurs personnes physiques ou morales que je voudrais remercier.

Je suis reconnaissant au Prof Ibrahima Thioub, Recteur de l'Université Cheikh Anta Diop de Dakar pour les conditions qu'il a toujours créées en vue de la mise à la disposition des étudiants d'un cadre propice et de mécanismes administratifs adaptés à leurs contraintes en vue d'une réussite dans leur cursus. Les autorités de l'Ecole Doctorale Sciences de la Vie, de la Santé et de l'environnement (ED-SEV) ont adopté un mode de management qui a favorisé et valorisé l'implication des doctorants dans leur formation. Ce mode de management cadre avec les exigences du système Licence-Master-Doctorat et a pour mérite non seulement d'assurer une formation scientifique solide aux doctorants mais aussi il contribue à leur développement personnel et leur permet d'aborder avec plus de sérénité le monde de l'emploi. Qu'il me soit alors permis de remercier le Directeur de l'ED-SEV, Prof Abdoulaye Samb ainsi que tous les membres de son équipe dont la secrétaire administrative, Mme Fama Diop, pour sa sollicitude et sa disponibilité inaltérable. Les conseils avisés de Prof Kandioura Noba ont contribué à impulser en moi la dynamique de préparation de cette thèse de doctorat. Je lui suis par ailleurs reconnaissant pour m'avoir accueilli au sein de sa formation doctorale « Production et protection des végétaux ».

Les observations des membres du jury lors de la soutenance de cette thèse ont contribué à rehausser la valeur scientifique du document. Je remercie de ce fait, Prof Kandioura Noba pour avoir accepté de présider le jury. Je remercie les rapporteurs Prof Diégane Diouf, Prof M'Baye Diop et Dr Mamadou Kabirou N'Diaye pour leurs observations pertinentes. Merci à Dr Bertrand Muller pour avoir joué le rôle d'examineur pendant la soutenance. Mon Directeur de thèse, Prof Aliou Guissé a apporté sa touche inestimable de rigueur scientifique et d'orientations qui m'ont toujours permis de rester dans le sujet et de « creuser davantage ». L'engagement au quotidien de mon encadrant principal, Dr Bertrand Muller, tant sur le plan scientifique, académique que social a été pour moi, une réelle source d'inspiration, de réconfort et d'espérance. Je n'oublierai jamais que Dr Muller fut sur le terrain, le manager général des activités liées à la thèse.

Les essais agronomiques ont été gérés sur le terrain avec la collaboration de plusieurs chercheurs de l'ISRA, du CERAAS et d'AfricaRice. Ce sont Saliou Djiba (ISRA Djibélor),

Bathé Diop et Baboucar Bamba (ISRA Djibélor), Dr Mayécor Diouf (CRZ Kolda), Dr Moustapha Guèye (CRZ Kolda ; c'est un ami, un conseiller et un frère), Ambroise Diatta (CRZ Kolda), Hamidou Tall (CRZ Kolda), Dr N'Diaga Cissé (CERAAS), Dr Daniel Foncéka (CERAAS), Dr Bassirou Sine (CERAAS), Dr Vincent Bado (AfricaRice), Dr Paul Kiepe (AfricaRice), Dr Karim Traoré (AfricaRice), Dr Kabirou N'Diaye (AfricaRice), Dr Alpha Bocar Baldé (AfricaRice), Malick N'Diaye (ISRA Saint-Louis), Demba Diakhaté (ISRA Nioro). Les chercheurs ont été aidés dans leurs missions par du personnel technique d'appui qu'il me plaît de remercier : Mamadou Lamine Sonko (ISRA Sinthiou Malème), Ismaéla Bassène (ISRA Séfa), Daniel Babène (CRZ Kolda), Benjamin Badji (CRZ Kolda), Abdoulaye Sow (AfricaRice Saint-Louis), Mel Valère (AfricaRice Saint-Louis), Rose Diambogne Diouf (CERAAS), Mbaye Sarr Diop (CERAAS) et Youssoupha Sankharé (ISRA Nioro).

Les organisations de développement rural Symbiose et Coordec de Koungheul ont facilité l'implantation et le suivi des essais en milieu paysan. Je voudrais remercier particulièrement Malick Ba et Penda Top (Symbiose) et Aminata Samb et El Hadj Alassane Sène (Coordec). Je remercie Awa Sarr, Samba Diakhaté et tous les paysans des localités ayant hébergé les essais paysans. Je remercie les étudiants-stagiaires qui ont participé à la collecte des données. Un premier groupe est venu de l'ISFAR de Bambey : Yagouba Diao, Gabriel Jean Rel Diatta, Ousmane Aïdara, Kohomta Kameldy, Cheikh Ndiaye, Alioune Ngom, Fa Massiré Badji, Abdoul Aziz Diop, Moumini Diallo, Cheikh Samb, Moussa Touré et Alassane Diop. Un second groupe provenait du CNFTAGR de Ziguinchor : Christian Corneille Mbengue, Jules Nzalé, Edgar Bassène, Lama Diallo, Limamou Khoulé et Mamino Sané. Je suis reconnaissant aux chauffeurs d'AfricaRice et du CERAAS qui ont été mes compagnons de route lors des nombreuses missions sous le soleil, la pluie, à travers les flaques d'eau, pendant le jour et pendant la nuit. A AfricaRice, je pense notamment à Omar Fall et El Hadj et au CERAAS, il s'agit d'Ibrahima Diouf, Saliou Gning, Aly Égué Ka, Malick Ndiaye, Makha Dembélé et Jean-Michel Manga. Je pense aussi aux chauffeurs indépendants Fallou 1 et 2.

Ma gratitude est aussi dirigée à l'endroit des membres du personnel administratif de AfricaRice Saint-Louis, du CERAAS, du CIRAD et du projet ESA-C2D qui ont facilité la gestion des fonds issus des projets AfricaRice-CCAFS, EarthAudit, du GRiSP pour la conduite des travaux de terrain, du DAAD pour les frais académiques et de subsistance, du CIRAD (Action incitative) pour les formations à Montpellier et du C2D pour la finalisation de la rédaction du présent document à l'UMR AÏDA du CIRAD. Je suis reconnaissant aux

chercheurs du CIRAD, Edward Gérarddeaux, Philippe Oriol et Myriam Adam pour m'avoir initié à l'utilisation des modèles de culture. Eric Gozé (CIRAD Montpellier) et Diarétou Diop (CERAAS) m'ont beaucoup aidé à utiliser R. Audrey Dardou (CIRAD) m'a aussi aidé dans l'analyse de mes données lors de mon séjour au CIRAD en 2013. Merci à Alain Audebert d'avoir accepté de commenter mes posters aux différentes Journées des Doctorants à Montpellier.

Les échanges scientifiques effectués avec les étudiants en année de Master et les doctorants présents au CERAAS pendant la période de cette thèse ont contribué d'une manière ou d'une autre à faire avancer mon travail. De ce fait, je remercie Drs Nouhoun Belko, Seyni Salack, Mme Marème Niang-Belko, Dr Roger Bayala (il fut aussi mon tuteur), Hodo-Abalo Tossim, Nath Bogie, Dr Aliou Faye, Dr Bassiaka Ouattara, Dr Lucie Toumnou Aba, Dr Thierry Tovignan, Dr Patrice Kouakou, Dr Joël Romaric Nguelpjop, Dr Halimé Mahamat Hissene, Dr Emile Agbangba, Désiré Ganyo et Jacques Akata. Romaric, Désiré et Jacques ont consenti d'énormes sacrifices pour moi pendant la période de mon absence du Sénégal.

Prof Brou Casimir, Prof Abo Kouabenan et Prof Danho Mathias, enseignants-chercheurs au Département Agriculture et Ressources Animales (DFR ARA) de l'INP-HB de Yamoussoukro m'ont recommandé au Comité de sélection pour la bourse DAAD et ont facilité ma mise en stage au Sénégal. Qu'ils soient remerciés pour toutes les actions posées en ma faveur. Je dis aussi merci à tous les collègues et collaborateurs du DFR ARA pour leur soutien multiforme et pour la confiance qu'ils ont placée en ma personne pour présider aux destinées du DFR ARA.

Je remercie les frères et sœurs en Christ des églises Assemblées de Dieu et Vases d'Honneur de Thiès (dont les familles d'Olivier Guédé, Bouba Francis et Thomas Mendy), de Montpellier (particulièrement ma tutrice Lauriane Natacha Loury) et de Yamoussoukro pour leur soutien spirituel durant toute la période de la thèse. J'ai un sentiment particulier de reconnaissance à l'égard des Pasteurs Albert Koffi, Bilé N'Zébo, Hillah Ayité et à l'égard des familles de Kouamé Jérémie, Kouassi Anicet et Kouadio Osée. Je dis aussi merci à mes parents Kitan, Komey Loukou, Komey N'Goran, Pasteur Kouadio Brou et mes beaux-parents Saouré pour les nombreuses paroles de bénédiction.

Je remercie enfin tous ceux qui de près ou de loin ont apporté leur pierre à l'édification de la présente œuvre et qui n'ont pas été nommément cités.

Résumé

La politique affichée de l'Etat du Sénégal à développer le riz pluvial couplée à une augmentation des volumes pluviométriques et une mise à la disposition des riziculteurs de variétés de riz pluvial à cycle court et à haut rendement grains ont contribué à l'extension des rizières pluviales en dehors des zones traditionnelles de culture. La thèse a pour objectif d'étudier les possibilités de culture du riz pluvial dans ces différentes zones agroécologiques ainsi que les risques agroclimatiques liés à cette activité. Pour ce faire, des variétés de riz supposées adaptées aux écologies à climat fluctuant et à pluviométrie modérée ont été mises en essais dans trois zones agroécologiques du Sénégal : le Bassin arachidier, le Sénégal oriental et la Casamance. Trois groupes de variétés ont été étudiées : des variétés hybrides NERICA, des variétés asiatiques *Oryza sativa* (L.) et des variétés hybrides autres que les NERICAs. Sur trois années d'expérimentation, les meilleures performances agronomiques ont été observées avec les NERICAs. Les variétés asiatiques avaient des performances moyennes et les autres types d'hybrides avaient les plus faibles performances. En année de bonne pluviométrie, les variétés très précoces se sont montrées plus performantes sur les sites situés au nord de la zone étudiée c'est-à-dire dans le Bassin arachidier et au Sénégal oriental. Indépendamment de l'année, les plants de riz ont été moins performants dans le Bassin arachidier que dans les trois autres zones. Quatre des meilleures variétés, des NERICAs, ont été utilisées pour paramétrer le modèle de culture CERES-Rice en vue d'effectuer des analyses de risques agroclimatiques. Le calibrage du modèle a révélé des dysfonctionnements graves liés à la non opérationnalité des modules prenant en compte le bilan hydrique et le paramètre de fertilité SLPF. CERES-Rice mérite alors d'être amélioré pour être apte à effectuer des analyses de risques agroclimatiques puisque les contraintes majeures dans les zones rizicoles pluviales demeurent la problématique de la satisfaction des besoins en eau et en nutriments des plants.

Mots-clés : Modèle de culture, CERES-Rice, riz pluvial, NERICA, *Oryza sativa* (L.), risques agroclimatiques, Sénégal

Abstract

In order to reduce the quantity of imported rice, policies in Senegal decided to develop the production of rainfed rice. The thesis aims to study the possibility of cultivating rainfed rice and the climatic risks in Senegal. Trials have been carried out on some rice varieties which were supposed to be suitable for soudano-sahelian environments. Three agroecological zones have been chosen for the trials: Bassin arachidier, Sénégal oriental and Casamance. Three groups of rice have been tested: NERICAs, *Oryza sativa* (L.) and hybrid varieties different from NERICAs. The results showed that NERICAs had the best agronomic traits compared to the other groups. During the year of abundant rainfall, the yields of the shortest cycle length varieties were better in the north zones, especially in the Bassin arachidier. During the three trial years, the lowest agronomic traits were observed in that agroecological zone. Four of the best rice varieties over all the experimentations were used to calibrate the crop model CERES-Rice embedded on DSSAT v 4.6. The parameterization was operated on NERICA 1, NERICA 4, NERICA 8 and NERICA 11. The aim of the procedure of parameterization was to perform some agroclimatic risks linked to rainfed rice. Unfortunately, it has been discovered that CERES-Rice was unable to take into account the effects of limit water supply on rice plants development and grain filling. Moreover, the SLPF parameter that modulates the soil fertility was not operable on CERES-Rice. The crop model CERES-Rice must therefore be ameliorated before performing climatic risks.

Keywords : Crop model, CERES-Rice, rainfed rice, NERICA, *Oryza sativa* (L.), agroclimatic risks, Senegal

Table des matières

| | |
|--|------|
| Avant-propos | IV |
| Résumé | VII |
| Abstract | VIII |
| Acronymes, sigles et abréviations | XII |
| Liste des tableaux | XIV |
| Liste des figures | XV |
| Introduction générale..... | 1 |
| Chapitre 1 : Synthèse bibliographique sur le riz | 5 |
| 1.1 Historique de la riziculture en Afrique de l'Ouest | 5 |
| 1.2 Morphologie de la plante de riz..... | 6 |
| 1.2.1 Racines | 7 |
| 1.2.2 Tige | 7 |
| 1.2.3 Feuilles..... | 8 |
| 1.2.4 Organes reproducteurs | 9 |
| 1.3 Stades de développement du riz | 11 |
| 1.4 Phases de développement de la plante | 13 |
| 1.4.1 Phase végétative..... | 13 |
| 1.4.2 Phase reproductive | 13 |
| 1.4.3 Phase de maturité | 13 |
| 1.5 Ecologie de la plante de riz | 14 |
| 1.5.1 Exigences édaphiques du riz | 14 |
| 1.5.2 Exigences en chaleur..... | 14 |
| 1.5.3 Exigences en eau..... | 15 |
| Chapitre 2 : Performances agronomiques de variétés de riz pluvial de plateau dans différentes zones agroécologiques au Sénégal | 16 |
| 2.1 Introduction | 16 |
| 2.2 Matériels et méthode | 17 |
| 2.2.1 Sites expérimentaux | 17 |
| 2.2.1.1 Présentation générale..... | 17 |
| 2.2.1.2 Caractéristiques édaphiques des sites d'étude..... | 19 |
| 2.2.1.3 Caractéristiques climatiques des sites d'étude | 19 |
| 2.2.2 Matériel végétal | 19 |
| 2.2.3 Dispositifs expérimentaux | 22 |
| 2.2.4 Conduite des essais | 22 |
| 2.2.5 Paramètres agronomiques mesurés et calculés | 23 |
| 2.2.5.1 Durée de cycle | 24 |
| 2.2.5.2 Hauteur des plants | 25 |

| | |
|---|----|
| 2.2.5.3 Rendement et indice de récolte | 25 |
| 2.2.5.4 Composantes du rendement | 25 |
| 2.2.6 Traitement et analyse de données | 26 |
| 2.3 Résultats | 26 |
| 2.3.1 Caractéristiques des sols des essais..... | 26 |
| 2.3.2 Températures enregistrées au cours des essais | 27 |
| 2.3.3 Caractéristiques de la pluviométrie..... | 28 |
| 2.3.4 Performances variétales pendant l'année 2012..... | 29 |
| 2.3.4.1 Durée de cycle..... | 29 |
| 2.3.3.2 Paramètres de croissance et de rendement | 30 |
| 2.3.5 Performances variétales pendant l'année 2013..... | 35 |
| 2.3.5.1 Durée de cycle..... | 35 |
| 2.3.5.2 Paramètres de croissance et de rendement | 35 |
| 2.3.6 Performances variétales pendant l'année 2014..... | 39 |
| 2.3.6.1 Durée de cycle..... | 39 |
| 2.3.6.2 Paramètres de croissance et de rendement | 39 |
| 2.3.7 Performances variétales avec prise en compte de l'effet année..... | 43 |
| 2.3.7.1 Durée de cycle..... | 43 |
| 2.3.7.2 Paramètres de croissance et de rendement | 43 |
| 2.4 Discussion | 46 |
| 2.5 Conclusion..... | 49 |
| Chapitre 3 : Simulation de la croissance et du développement de variétés de riz pluvial à partir de modèles de culture dans différentes zones agroécologiques au Sénégal..... | |
| 3.1 Introduction | 50 |
| 3.2 Matériel et méthodes | 51 |
| 3.2.1 Sites des essais | 51 |
| 3.2.1.1 Situation géographique..... | 51 |
| 3.2.1.2 Données pédoclimatiques..... | 52 |
| 3.2.2 Matériel végétal | 53 |
| 3.2.3 Description des essais | 54 |
| 3.2.3.1 Conduite agronomique | 54 |
| 3.2.3.2 Caractéristiques des essais | 55 |
| 3.2.4 Description du modèle de culture utilisé et procédure de modélisation | 57 |
| 3.2.4.1 Présentation du modèle CERES-Rice | 57 |
| 3.2.4.2 Calibration du modèle CERES-Rice..... | 60 |
| 3.2.4.3 Validation du modèle CERES-Rice | 61 |
| 3.3 Résultats | 62 |
| 3.3.1 Calibration-validation de la phénologie..... | 62 |
| 3.3.2 Conditions d'opérationnalité de CERES-Rice pour la calibration de la biomasse.. | 64 |
| 3.3.2.1 Problème concernant les interactions hydriques sol-plante | 64 |
| 3.3.2.2 Non fonctionnalité du paramètre SLPF | 66 |
| 3.3.2.3 Insensibilité aux paramètres gouvernant le remplissage des grains | 66 |

| | |
|---|----|
| 3.3.3 Calibration du rendement grains pour une variété de cycle court | 67 |
| 3.3.4 Calibration du rendement grains pour une variété de cycle long..... | 68 |
| 3.3.4.1 Calibration du rendement grains en absence de stress hydrique et azoté..... | 68 |
| 3.3.4.2 Calibration du rendement grains avec des données provenant des essais ayant moins souffert de stress hydrique..... | 68 |
| 3.3.4.3 Calage du nombre de talles d'une variété de cycle long sur des essais ayant moins souffert de stress hydrique..... | 69 |
| 3.3.5 Validation du modèle..... | 70 |
| 3.4 Discussion | 71 |
| 3.5 Conclusion..... | 73 |
| Chapitre 4 : Essai d'analyse de risques climatiques par l'étude de l'effet de la date de semis sur le comportement de quatre variétés de riz pluvial à haut rendement grains pendant deux années de culture contrastées en zone soudano-sahélienne au Sénégal | |
| 4.1 Introduction | 74 |
| 4.2 Matériels et méthode | 75 |
| 4.2.1 Site expérimental | 75 |
| 4.2.2 Matériel végétal | 76 |
| 4.2.3 Conduite des essais | 76 |
| 4.2.4 Données climatiques | 77 |
| 4.2.5 Paramètres agronomiques mesurés et calculés | 77 |
| 4.2.6 Traitement et analyse de données | 77 |
| 4.3 Résultats | 78 |
| 4.3.1 Données climatiques | 78 |
| 4.3.2 Durée de cycle..... | 79 |
| 4.3.3 Hauteur des plants à la récolte | 81 |
| 4.3.4 Rendement et indice de récolte | 81 |
| 4.3.4.1 Rendement..... | 81 |
| 4.3.4.2 Indice de récolte | 81 |
| 4.3.5 Composantes du rendement | 82 |
| 4.3.5.1 Nombre de talles..... | 82 |
| 4.3.5.2 Nombre de panicules..... | 82 |
| 4.3.5.3 Taux de talles infertiles | 82 |
| 4.3.5.4 Nombre d'épillets par panicule | 83 |
| 4.3.5.5 Taux de stérilité..... | 83 |
| 4.3.5.6 Poids de mille grains | 83 |
| 4.4 Discussion | 86 |
| 4.5 Conclusion..... | 88 |
| Conclusion générale et perspectives | 89 |
| Références bibliographiques | 91 |

Acronymes, sigles et abréviations

Organismes et Instituts

ADRAO : Association pour le développement de la riziculture en Afrique de l'Ouest

AfricaRice : Centre du Riz pour l'Afrique

C2D : Contrat de Désendettement et de Développement

CCAFS : *Climate Change, Agriculture and Food Security*

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

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

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

CNFTAGR : Centre National de Formation des Techniciens en Agriculture et Génie Rural

CNRA : Centre National de Recherches Agronomiques

CRZ : Centre de Recherche Zootechnique

CSE : Centre de Suivi Ecologique

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

ED-SEV : Ecole Doctorale Sciences de la Vie, de la Santé et de l'Environnement

ESA : Ecole Supérieure d'Agronomie

FAO : *Food and Agriculture Organisation* (Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture)

FST : Faculté des Sciences et Techniques

GRiSP : *Global Rice Science Partnership*

IBSNAT: *International Benchmark Sites Network for Agrotechnology Transfer*

IITA : International Institute of Tropical Agriculture

INP-HB : Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny

IRAT : Institut de Recherches Agronomiques Tropicales

IRRI : *International Rice Research Institute*

ISFAR : Institut Supérieur de Formation Agricole et Rurale

ISRA : Institut Sénégalais de Recherches Agricoles

LNRPV : Laboratoire National de Recherche sur les Productions Végétales

UCAD : Université Cheikh Anta Diop de Dakar

Autres

CERES : *Crop Estimation through Resource and Environment Synthesis*

DSF : Durée de cycle semis-floraison

DSM : Durée de cycle semis-maturité

DSSAT : *Decision Support System for Agrotechnology Transfer*

EPIL : Nombre d'épillets par panicule

HAUT : Hauteur des plants à la récolte

IA : Indice d'agrément

INFERT : Taux de talles infertiles

IR : Indice de récolte

NERICA : *New Rice for Africa* (Nouveau riz pour l'Afrique)

PANI : Nombre de panicules à la récolte

PMG : Poids de mille grains

RDTG : Rendement grains

RDTP : Rendement paille

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

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

STERIL : Taux de stérilité des épillets par panicule

TAL : Nombre de talles à la récolte

Liste des tableaux

| | |
|---|----|
| Tableau I : Caractéristiques des sites des essais au cours des années 2012, 2013 et 2014. | 18 |
| Tableau II : Variétés de riz étudiées au cours des années 2012, 2013 et 2014 | 21 |
| Tableau III : Dates de semis des essais en fonction du site expérimental et de l'année d'étude | 23 |
| Tableau IV : Paramètres suivis au cours des essais | 24 |
| Tableau V : Valeurs moyennes des paramètres agronomiques en 2012 suivant la variété de riz et le site..... | 33 |
| Tableau VI : Valeurs moyennes des paramètres agronomiques en 2013 suivant la variété de riz et le site | 37 |
| Tableau VII : Valeurs moyennes des paramètres agronomiques en 2014 suivant la variété de riz et le site | 41 |
| Tableau VIII : Seuils de significativité des tests d'analyse de variance suivant les facteurs année, variété, site et leurs interactions..... | 45 |
| Tableau IX : Valeurs moyennes des paramètres agronomiques suivant l'année, la variété de riz et le site | 45 |
| Tableau X : Liste des essais utilisés pour la calibration et la validation du modèle étudié | 52 |
| Tableau XI : Quelques indicateurs ayant servi à établir une typologie des essais..... | 55 |
| Tableau XII : Coefficients génétiques sous CERES-Rice. | 61 |
| Tableau XIII : Rendements obtenus pour différentes combinaisons de valeurs G1 et G3 pour la variété de cycle court (en gras les rendements obtenus pour des valeurs réalistes de G1 et G3)..... | 67 |
| Tableau XIV : Valeurs moyennes des paramètres mesurés en 2013 suivant la date de semis, la variété, le cycle des variétés de riz et l'interaction entre la date de semis et les autres facteurs | 84 |
| Tableau XV : Valeurs moyennes des paramètres mesurés en 2014 suivant la date de semis, la variété, le cycle des variétés de riz et l'interaction entre la date de semis et les autres facteurs | 85 |

Liste des figures

| | |
|--|----|
| Figure 1 : Schéma d'un plant de riz | 10 |
| Figure 2 : Détail d'une panicule de riz..... | 10 |
| Figure 3 : Phases de développement du riz | 14 |
| Figure 4 : Localisation des sites des essais.. | 18 |
| Figure 5 : Analyse en composantes principales montrant les caractéristiques des sols des sites étudiés..... | 27 |
| Figure 6 : Températures maximale (Tmax), moyenne (Tmoy) et minimale (Tmin) enregistrées à Darou Pakathiar (DAR), Sinthiou Malème (SINT), Kolda (KOL) et Séfa (SEF) au cours des années 2012, 2013 et 2014. | 28 |
| Figure 7 : Analyse en composantes principales montrant les caractéristiques pluviométriques (a) des sites d'étude au cours des années 2012, 2013 et 2014 (b).. | 29 |
| Figure 8 : Durée de cycle semis-floraison des variétés de riz étudiées en 2012 à Darou Pakathiar, Sinthiou Malème, Kolda et Séfa. | 30 |
| Figure 9 : Analyses en composantes principales réalisées sur le rendement grains et ses composantes obtenus en 2012 à Darou Pakathiar , Sinthiou Malème , Kolda et Séfa..... | 34 |
| Figure 10 : Durée de cycle semis-floraison des variétés de riz étudiées en 2013 à Darou Pakathiar, Sinthiou Malème, Kolda et Séfa. | 35 |
| Figure 11 : Analyses en composantes principales réalisées sur le rendement grains et ses composantes obtenus en 2013 à Darou Pakathiar, Sinthiou Malème, Kolda et Séfa..... | 38 |
| Figure 12 : Durée de cycle semis-floraison des variétés de riz étudiées en 2014 à Darou Pakathiar, Sinthiou Malème, Kolda et Séfa.. | 39 |
| Figure 13 : Analyses en composantes principales réalisées sur le rendement grains et ses composantes obtenus en 2014 à N'Dama, Sinthiou Malème et Kolda.. | 42 |
| Figure 14 : Durée de cycle semis-floraison de NERICA 14 (N14), NERICA 8 (N8), NERICA 11 (N11), NERICA 1 (N1), NERICA 4 (N4) au cours des années 2012, 2013 et 2014 à Sinthiou Malème et à Kolda..... | 43 |
| Figure 15 : Stations automatiques CIMEL (station complète, en avant-plan) et TINYTAG (composée d'un capteur de température et d'un pluviomètre) utilisées pour la collecte des paramètres climatiques sur les essais. | 53 |
| Figure 16 : Analyse en composantes principales montrant les caractéristiques des essais utilisés dans la procédure de modélisation..... | 57 |
| Figure 17 : Durées semis-floraison simulées en fonction des données observées sur la variété courte (A) et la variété longue (B). | 63 |
| Figure 18 : Mise en évidence de l'insensibilité du modèle CERES-Rice à la réserve hydrique du sol à partir des données de l'essai biomasse 2 de l'année 2014 conduit à Sinthiou Malème, essai ayant souffert dans la réalité d'un stress hydrique prononcé. | 65 |

| | |
|--|----|
| Figure 19 : Comparaison des rendements grains simulés et observés sur les données issues des 19 essais sélectionnés pour les travaux de modélisation en fonction de la réserve utile (RU) du sol. | 66 |
| Figure 20 : Résultats de la calibration du modèle CERES-Rice sur le rendement grains des variétés à cycle long en condition non limitante et en condition de stress éventuel. | 69 |
| Figure 21 : Résultats du calage du nombre de talles par mètre carré avec la prise en compte d'éventuels stress..... | 70 |
| Figure 22 : Résultats de la validation du modèle sur le rendement grains obtenus à partir des essais conduits en 2012 à Séfa, Kolda et Sinthiou Malème et en 2013 à Séfa (essai « biomasse »)..... | 71 |
| Figure 23 : Températures maximales et minimales journalières et pluviométrie pentadaire enregistrées au cours des essais en 2013 et en 2014 avec positionnement des longueurs de cycle et de dates de floraison des variétés de riz.. | 80 |

Introduction générale

Au Sénégal, l'agriculture constitue la principale activité du secteur primaire. Elle occupe plus de la moitié de la population du pays et contribue environ pour 1/5 au produit intérieur brut (Durufle, 1996). On dénombre dans le pays, 3,8 millions d'hectares de terres arables (environ 20 % de la superficie du Sénégal) dont 65% sont effectivement mises en valeur chaque année. Le paysage agraire est à 98% dominé par les cultures pluviales (FAO, 2011). L'agriculture sénégalaise est de ce fait fortement tributaire de la pluviométrie et de ses aléas.

Situé en grande partie dans la zone sahélo-soudanienne, le Sénégal est soumis à un climat de type semi-aride tropical fortement fluctuant dans le temps et dans l'espace (Baron *et al.*, 2005; Sultan *et al.*, 2008 ; IPCC, 2007). La variabilité climatique est observée à l'échelle inter-annuelle et intra-saisonnière et suivant un double gradient latitudinal et longitudinal. Les volumes pluviométriques au cours d'une même année baissent rapidement du sud vers le nord passant de plus de 1000 mm à moins de 200 mm et la sévérité climatique s'accroît au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la côte maritime (Salack *et al.*, 2011).

De plus, dans la zone, les dates de démarrage de la saison pluvieuse sont difficilement maîtrisées et même les systèmes de prévision climatique montrent peu de fiabilité dans le domaine à cause des phénomènes récurrents, d'une année à l'autre, de faux départs. Les faux départs sont définis comme des événements pluvieux isolés observés dès le début de la saison des pluies (Salack *et al.*, 2011). Ces pluies isolées sont suivies de périodes de « jours sans pluie » plus ou moins longues et rendent la tâche difficile aux agriculteurs quant à la décision qu'ils ont à prendre de commencer ou non les semis de leurs cultures. Les faux départs sont par ailleurs la cause de l'échec des premiers semis et dans plusieurs cas d'autres semis s'avèrent nécessaires, ce qui augmente le coût des semences (Salack *et al.*, 2011 ; Balme *et al.*, 2005).

En zone sahélienne comme dans toute l'Afrique de l'Ouest, les poches de sécheresse ont été observées ces dernières décennies avec une certaine récurrence sur toute la durée de la saison culturale entraînant ainsi une forte variabilité dans les caractéristiques de la saison agricole (Traoré *et al.*, 2000). Des études récentes ont par ailleurs montré qu'au Sénégal ces pauses pluviométriques ont des durées évaluées à deux semaines pendant les périodes de la

croissance végétative des cultures et d'une à deux semaines pendant la seconde moitié de la saison culturale (Salack *et al.*, 2012). Tous ces aléas climatiques entraînent souvent des baisses de la pluviosité de l'ordre de 20 à 40% d'une année à l'autre quoiqu'en général une tendance à la hausse des pluviométries ait été notée depuis les années 2000 (Salack *et al.*, 2011 ; Lebel et Ali., 2009 ; Lodoun *et al.*, 2013). Pendant les années de déficit pluviométrique, la saison des pluies se trouve raccourcie et l'on assiste à un glissement des isohyètes de l'ordre de 150 à 200 km vers le sud (Diouf *et al.*, 2000).

Durufle (1996) rapporte que les investissements dans le secteur agricole au Sénégal n'ont cessé d'augmenter tandis que la production globale connaît une forte baisse, en partie due à la dégradation des terres, la destruction du couvert végétal, la pollution des eaux de surface et des nappes et les contraintes climatiques. Tous systèmes de production confondus, les quatre grandes cultures céréalières pratiquées sont, par ordre d'importance des superficies cultivées, le mil/sorgho (environ 1 million d'ha avec un rendement moyen de 0,6 t.ha⁻¹), le riz (96 000 ha à 2,3 t.ha⁻¹) et le maïs (70 000 ha à 0,9 t.ha⁻¹) (FAO, 2011). Au Sénégal, les productions de paddy augmentent chaque année et sont passées de moins de 100 000 t au début des années 60 à plus de 200 000 t en cours des années 2000. Cette augmentation résulte de l'amélioration des rendements avec la mise en culture de variétés de riz améliorées, de l'augmentation des surfaces cultivées et d'une politique soutenue de développement de la riziculture (PCE, 2013).

La production du riz pluvial avait été longtemps confinée en Basse Casamance, zone traditionnelle de culture du riz. Aujourd'hui, le riz est principalement produit en Basse Casamance (région de Ziguinchor), en Haute Casamance (région de Kolda, Vélingara), en Moyenne Casamance (région de Sédhiou), dans la Vallée du Fleuve Sénégal (régions de Saint-Louis, Matam) et dans une moindre mesure dans le Sénégal oriental (régions de Tambacounda et Kédougou) et le Bassin arachidier (région de Fatick, Kaolack et Nioro) (Gueye, 2004). La riziculture Sénégalaise est pratiquée essentiellement par de petits exploitants et elle fait vivre directement entre 200 000 et 300 000 ménages, soit au moins 1,5 millions de personnes dont pour la plupart le riz est l'aliment de base. Il existe deux types principaux de riziculture au Sénégal : la riziculture irriguée et la riziculture pluviale.

La culture du riz en irrigué est effectuée dans la Vallée du Fleuve Sénégal et dans le Bassin de l'Anambé. Au début, la culture du riz était vivrière, maintenant elle est commerciale. Les surfaces mises en valeur et exploitées tournent autour de 60 000 ha sur des potentialités de

240 000 ha dans la Vallée du Fleuve et dans le Bassin de l'Anambé avec 4 180 ha aménagés sur un potentiel de 12 000 ha. En zone irriguée notamment dans la région du Fleuve Sénégal, les variétés dites de cycle court (90-110 jours) sont utilisées à la fois pour la saison des pluies et la contre saison (ex : la variété Sahel 108), et les variétés à cycle moyen (110 à 120 jours) telles que Sahel 201, Sahel 202, IR 1529 et Jaya sont essentiellement utilisées pour la saison pluvieuse. Le rendement moyen en riziculture irriguée est de 5,0-6,0 t.ha⁻¹ avec des pics de 8,0-9,0 t.ha⁻¹ (Dieng *et al.*, 2011).

La riziculture pluviale est une activité d'autosuffisance pratiquée en général par les femmes depuis toujours. Dans ce système, le travail est encore manuel sur de petites surfaces, sans engrais ni matériel végétal amélioré et les rendements restent encore très faibles. Toutes les opérations de récolte et post-récolte sont manuelles, du fauchage de la panicule, au décorticage au mortier, mais le produit est de bonne qualité et est apprécié par les populations (PNAR, 2009). Dans le Sud, la région de Kolda dispose d'un potentiel de 50 000 ha de terres rizicultivables en pluvial dont 16 000 ha réparties dans différentes vallées. La région de Sédhiou dispose d'un potentiel de 56 000 ha de terres rizicultivables en culture pluviale dont 36 000 ha dans différentes vallées, et 20 000 ha sur le plateau. Enfin, dans la région de Ziguinchor, le potentiel rizicole est de 116 000 ha. La riziculture se pratique généralement à une petite échelle le long des vallées inondables et de manière encore essentiellement traditionnelle. Les variétés disponibles pour la riziculture pluviale de plateau sont essentiellement NERICA 1, NERICA 2, NERICA 3, NERICA 4, NERICA 5, NERICA 6, DJ 8, DJ 11, ITA 150, IRAT 10 et WAB 56-50. Le rendement moyen est de 1,5-3,0 t.ha⁻¹. Pour le riz de bas-fonds, les variétés disponibles sont : DJ 12-519, ITA 123, TOX 728-1, BW 248-1, DJ 684 -D, ROCK -5, WAR -1, WAR- 77, BG-90-2. Le rendement moyen en riziculture de bas-fonds est de 3,0 t.ha⁻¹ (Dieng *et al.*, 2011).

A la faveur de l'augmentation des volumes pluviométriques ces dernières années, l'on a assisté à une remontée spontanée vers le nord du front rizicole pluvial alors que les variabilités interannuelle et intra-saisonnière de la pluviométrie restent des caractéristiques fortes de ces régions. De plus, rien ne garantit que l'augmentation globalement constatée de la pluviométrie se maintienne (IPCC, 2007 ; Scoones, 1995). La question de fond qui se pose est donc celle de la pertinence réelle de cette extension des zones rizicoles pluviales et du dispositif à mettre en place pour l'accompagner et l'orienter à travers un appui-conseil auprès des agriculteurs et opérateurs du développement. La thèse vise alors les objectifs suivants : (i)

identifier parmi les meilleures variétés de riz pluvial cultivées dans la sous-région, celles qui sont les mieux adaptées et ont de meilleures performances agronomiques dans les milieux de culture du riz pluvial au Sénégal ; (ii) caler et valider un modèle de culture sur ces variétés performantes ; (iii) faire des analyses de risques climatiques à l'aide du modèle ainsi calé et validé pour orienter les possibilités de culture du riz pluvial au Sénégal.

Le document est subdivisé en quatre parties. La première partie présente une synthèse bibliographique sur le riz. La deuxième partie présente des études réalisées en divers sites du Sénégal au cours des années 2012, 2013 et 2014 et portant sur les performances agronomiques de variétés de riz pluvial en fonction des zones de culture. La troisième partie s'intéresse à l'utilisation du modèle de culture CERES-Rice de la plateforme DSSAT pour simuler la phénologie, la production de biomasse et de grains de riz pluvial au Sénégal. La quatrième partie est dédiée à des analyses de risques agroclimatiques en riziculture pluviale au Sénégal.

Chapitre 1 : Synthèse bibliographique sur le riz

1.1 Historique de la riziculture en Afrique de l'Ouest

Le riz est une plante plastique que l'on retrouve dans différentes zones agroclimatiques du monde. Elle pousse tant en régions tempérées qu'en zones tropicales. Son aire de répartition s'étend de 50° de latitude nord (Chine) à 40° de latitude sud (Australie) et depuis le niveau de la mer au Brésil jusqu'à des altitudes de 2 000 m à Madagascar et 3 000 m au Népal (Renard, 1983). La culture du riz est pratiquée sous des climats frais d'altitude tels que ceux rencontrés au Japon (17°C), sous des climats chauds comme ceux du désert du Pakistan (33°C) et sur des terres sèches ou inondées d'Afrique et d'Asie (Renard, 1983 ; Swaminathan, 1984). Parmi les 24 espèces du genre *Oryza*, *Oryza sativa* L. et *Oryza glaberrima* Steud. sont les deux espèces de riz actuellement cultivées à travers le monde (IRRI, 2005). Bien qu'ayant des origines géographiques différentes (Sweeney et McCouch, 2007), elles sont toutes deux cultivées en Afrique et plus particulièrement en Afrique de l'Ouest. *O. sativa*, d'origine asiatique, est la plus répandue et se retrouve dans toutes les zones rizicoles du monde. Originaire du delta central du fleuve Niger (région de Mopti), *O. glaberrima* s'est répandu à travers toute l'Afrique de l'Ouest d'abord du Cap Vert au Tchad et ensuite du Sénégal à la Guinée-Conakry en passant par la Gambie et la Guinée-Bissau (Portères, 1955 ; Angladette, 1966 ; Sié, 1991). Domestiquée en Afrique de l'ouest depuis 1 500 avant Jésus-Christ, la culture de *O. glaberrima* a eu une expansion spatiale très limitée suite à l'introduction du riz asiatique *O. sativa* par les Portugais et les Hollandais au XV^e siècle. Cette introduction a été effectuée à partir des côtes de la Casamance, de la Sierra Léone et du Libéria (Angladette, 1966 ; Porterès, 1956). La diffusion de géotypes améliorés de *O. sativa* à plus fort potentiel de production que les variétés locales africaines a contribué à l'expansion du riz d'origine asiatique sur tout le continent africain (Portères, 1949 ; IRAT, 1967 ; Bezançon, 1993). Cette dynamique a été renforcée dans les années 60 et 70 suite à l'arrivée massive de variétés améliorées ayant contribué à la « révolution verte » sur le continent asiatique (Volvey *et al.*, 2005). Cependant, sur le terrain, la culture du riz asiatique s'est montrée plus exigeante en eau, en engrais et en pesticides que les géotypes africains. Ces variétés importées étaient par ailleurs ravagées par les maladies, les sécheresses et les problèmes liés aux sols alors que les variétés traditionnelles, quoique peu productives, étaient très résistantes à toutes ces contraintes dans les mêmes milieux de culture (Volvey *et al.*, 2005). La recherche scientifique

a dès lors dirigé ses efforts sur la mise au point de variétés combinant à la fois les caractéristiques de production de *O. sativa* et les capacités adaptatives de *O. glaberrima* aux écologies rustiques africaines (Ndjiondjop *et al.*, 2010 ; Volvey *et al.*, 2005). C'est ainsi qu'une équipe de chercheurs de l'ADRAO (Association pour le Développement de Riziculture en Afrique de l'Ouest) conduite par Dr Monty Jones a mis au point des variétés dénommées NERICA (New Rice for Africa) en 1995 (Jones *et al.*, 1997a, b). Ces nouveaux riz hybrides, à l'instar de leurs parents africains (*O. glaberrima*), ont une croissance végétative accélérée et étouffent les mauvaises herbes dès leurs premiers stades de croissance. Cet atout permet aux NERICAs de mobiliser plus efficacement la lumière et les ressources hydrominérales du sol (ADRAO, 2002 ; ADRAO, 2006). Ils contribuent par ailleurs à réduire de l'ordre de 40 à 60 % le temps de travail consacré au désherbage par les riziculteurs. Les variétés de riz NERICAs s'accommodent des sols acides et déficients en unités fertilisantes et résistent mieux aux maladies, aux insectes et autres parasites des zones rizicoles africaines. Tout comme leurs parents asiatiques (*O. sativa*), les NERICAs sont plus productives que leurs parents traditionnels. En effet, les NERICAs ont un potentiel de production de paddy équivalent au double de celui des génotypes africains sur des sols non fertilisés et au triple en condition d'apport de fumure. Le nombre d'épillets produits par les NERICAs est 4 fois supérieur à celui des variétés traditionnelles et ces nouveaux riz hybrides arrivent à maturité 30 à 50 jours plus tôt que les variétés traditionnelles (ADRAO, 2002 ; ADRAO, 2006 ; Volvey *et al.*, 2005 ; Akinbile *et al.*, 2007). Ces différents atouts des NERICAs combinés à une politique soutenue de diffusion assurée par AfricaRice (ex-ADRAO) et les systèmes nationaux de recherche agronomique des pays africains, ont contribué à une large expansion de ces nouveaux riz hybrides dans les rizières africaines (ADRAO, 2006).

1.2 Morphologie de la plante de riz

Le riz est une Monocotylédone appartenant à la famille des Poacées et à la tribu des Oryzées. Cette tribu est subdivisée en 12 genres. Le genre *Oryza* compte 24 espèces dont seulement deux sont cultivées : *Oryza sativa* L. et *Oryza glaberrima* Steud. (IRRI, 2005). Le riz est une plante herbacée annuelle ou pérenne (certaines formes sauvages), diploïde et autogame (Courtois, 2007). Parmi les formes sauvages, cinq ont une origine africaine et trois d'entre elles poussent dans des écologies du Sénégal et du sahel ouest-africain : *Oryza barthii* A. Chev., *Oryza brachyantha* A. Chev. et Roehr et *Oryza longistaminata* A. Chev. et Roehr (IRRI, 2005). Ces formes sauvages préfèrent des habitats inondés ou humides en conditions

de plein soleil. Ils peuvent dès lors constituer des pools de gènes pour la mise au point de nouvelles variétés de riz cultivées pour des écologies pluviales de bas de pente.

Les organes végétatifs du riz sont constitués de la racine, de la tige, des feuilles et les organes reproducteurs sont essentiellement formés des épillets portés par la panicule.

1.2.1 Racines

Le système racinaire du riz assure les fonctions d'ancrage, d'absorption et de stockage de l'eau et des éléments minéraux. Il est de type fasciculé et peu profond lorsque la ressource hydrique n'est pas limitante (Reyniers *et al.*, 1980 ; Angladette, 1966 ; Arradeau et Vergara., 1992). Les racines présentent un aspect fibreux et sont de deux types : les racines embryonnaires, issues de la radicule et les racines secondaires. Les racines embryonnaires atteignent une longueur maximale de 15 cm et ne survivent pas au-delà du stade 7 feuilles (Yoshida, 1981). Les racines secondaires sont mises en place pour assurer l'autonomie nutritionnelle de la plante vis-à-vis des réserves du grain germé. Elles sont aussi appelées racines adventives du fait qu'elles prennent naissance à partir de la tige, plus précisément au niveau des nœuds inférieurs de la tige. L'on peut dénombrer entre 5 et 25 racines adventives au niveau de chaque nœud basal. Ces racines adventives sont mises en place dès avant le tallage et atteignent une biomasse maximale pendant la phase reproductive. Un pied de riz peut porter jusqu'à 2 000 racines dont chacune porte entre 10 et 30 radicules avec des poils absorbants (Lacharme, 2001 ; Yoshida, 1981). La profondeur d'enracinement et l'abondance du chevelu racinaire sont inversement proportionnelles au degré d'humectation du sol. Ainsi, en riziculture irriguée, les racines sont concentrées dans les 40 premiers centimètres du sol alors qu'en riziculture pluviale, les racines peuvent explorer le sol jusqu'à une profondeur de 1 m (Arradeau et Vergara, 1992 ; Yoshida, 1981).

1.2.2 Tige

Le système caulinaire du riz est formé de tiges cylindriques disposées en touffes généralement dressées (Figure 1). La hauteur de la tige peut varier entre 50 cm et 150 cm et même atteindre 6 m chez les variétés flottantes (Angladette, 1966 ; Bezançon, 1993). La coloration de la tige peut varier suivant la variété et le stade de végétation. Chaque tige ou chaume est formée d'une succession de nœuds pleins et d'entre-nœuds creux. Les nœuds constituent la zone d'insertion des feuilles sur la tige et chacun porte un bourgeon qui peut se différencier en tige secondaire. Chaque entre-nœud est recouvert par la gaine de la feuille issue du nœud directement inférieur. La longueur de l'entre-nœud est fonction de sa position sur la tige : il

est plus court à la base et plus long au sommet de la tige. La taille de l'entre-nœud joue un rôle majeur dans la résistance des plants de riz à la verse. Des entre-nœuds plus courts confèrent à la plante une plus grande résistance à la verse. Cette fonction mécanique de la tige est aussi modulée par son diamètre, sa robustesse et sa hauteur. La tige assure par ailleurs le transport de l'eau et des éléments nutritifs ; elle est le conduit d'approvisionnement des racines en air. Au cours de la phase végétative, des bourgeons des nœuds inférieurs de la tige principale (ou brin maître) donnent naissance selon un ordre alternatif à d'autres tiges appelées talles secondaires : c'est le tallage. Les talles de premier ordre donnent naissance aux talles de second ordre qui éventuellement, à leur tour, donnent des talles de troisième ordre. En définitive, la touffe de riz est constituée de l'ensemble des talles produites par un plant de riz. Le nombre de talles produites au stade fin tallage (entre 3 et 60 par touffe) est une caractéristique variétale mais elle dépend aussi des conditions et pratiques culturales. Pendant la phase reproductive du riz, chacune des talles fertiles porte à son sommet une panicule (Arraudeau, 1998 ; Lacharme, 2001 ; Wopereis *et al.*, 2008).

1.2.3 Feuilles

Les feuilles de riz sont sessiles et disposées de façon alterne le long de la tige (Figure 1). Chaque nœud de la tige porte une seule feuille à la fois. La dernière feuille d'où émerge la panicule est appelée feuille paniculaire ou feuille drapeau. Une tige de riz produit au cours de son cycle végétatif un total de 10 à 20 (Yoshida, 1973, 1975) feuilles dont 5 à 10 seulement vivent et les autres se dessèchent au fur et à mesure du développement de la plante. Au sein d'une touffe de riz, la talle primaire ou brin maître développe un plus grand nombre de feuilles par rapport aux autres talles (Lacharme, 2001). Le limbe, étendu et lancéolé est la partie de la feuille qui assure l'essentiel de l'activité photosynthétique. Sa longueur varie entre 30 cm et 100 cm et sa largeur est comprise entre 5 et 25 mm (Angladette, 1966 ; Dobelmann, 1976). En fonction de la variété, le port du limbe peut être érigé, oblique ou retombant. Ce port joue un rôle dans la hauteur de la touffe de riz et dans l'interception des rayons solaires. La gaine de la feuille entoure la tige et contribue à sa protection. Pendant les premiers jours de végétation, la tige est essentiellement constituée par la gaine foliaire. A la zone de jonction entre la gaine et le limbe se trouve une paire de lamelles de 2 à 5 mm en forme de croissant appelées auricules. Les auricules sont garnies de poils et sont supplantées par une membrane triangulaire, la ligule. Le riz est la seule graminée qui possède à la fois la ligule et l'auricule, ce qui permet de le distinguer des mauvaises herbes, au stade plantule. Les caractéristiques

morpho-métriques des composantes de la feuille de riz dépendent de l'espèce et même de la variété (Lacharme, 2001 ; Wopereis *et al.*, 2008).

1.2.4 Organes reproducteurs

Les organes reproducteurs du riz sont formés d'un ensemble de fleurs hermaphrodites ou épillets regroupés au sein d'une inflorescence, la panicule (Figure 1). La panicule est fixée au nœud terminal de la tige par un pédoncule. La longueur de la panicule est comprise entre 10 et 30 cm. Elle est érigée au moment de la floraison mais tend généralement à prendre la forme d'une faucille sous l'effet du poids des épillets qui se remplissent, mûrissent et deviennent des grains. Selon les variétés, la panicule porte des ramifications primaires ou racèmes, subdivisées en ramifications secondaires et parfois même en ramifications tertiaires (Figure 2). En fonction des variétés, ces ramifications portent entre 50 et 500 épillets pédicellés. Les caractéristiques de la panicule (longueur, forme, angle des ramifications primaires par rapport à l'axe de la panicule) diffèrent suivant la variété. La formation du grain de riz commence avec l'autofécondation d'un épillet. A maturité, le grain de riz paddy est constitué de trois parties essentielles : l'enveloppe, la barbe et l'endosperme. L'enveloppe est constituée par deux glumes (appendices situés au-dessus des pédicelles des épillets) et deux glumelles, l'une supérieure avec trois nervures (paléa) et une inférieure avec cinq nervures (lemma). Les glumelles couvrent le grain du riz (caryopse) et constituent la balle de riz au décorticage. Chez certaines variétés, la nervure ventrale de la glumelle inférieure se prolonge en une excroissance qui termine le bout supérieur du grain : c'est la barbe. L'endosperme est la partie du riz qui est constituée de réserves nutritives et qui fait l'objet de consommation humaine. C'est aussi la source alimentaire de l'embryon qui est situé sur la partie ventrale du caryopse (Lacharme, 2001 ; Wopereis *et al.*, 2008).

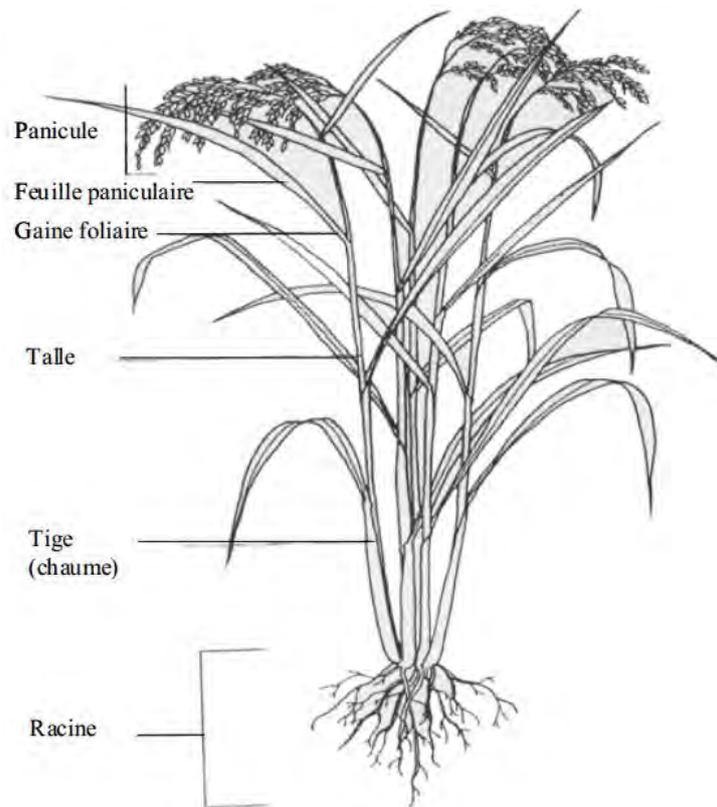


Figure 1 : Schéma d'un plant de riz (Wopereis et al., 2008)

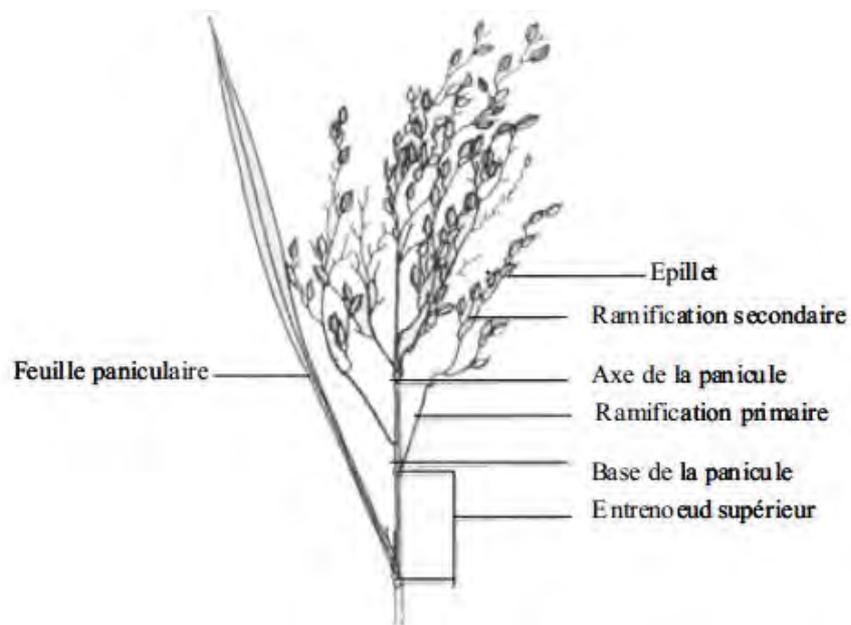


Figure 2 : Détail d'une panicule de riz (Wopereis et al., 2008)

1.3 Stades de développement du riz

Le cycle du riz est habituellement subdivisé en 10 stades de développement numérotés de 0 à 9 (Wopereis *et al.*, 2008 ; IRRI, 2002 ; BBCH, 2001):

Germination (stade 0). La germination est caractérisée par la reprise des activités physiologiques au sein de la graine. Ce phénomène est déclenché par une humidité suffisante équivalente au quart du poids de la graine dans un environnement offrant une température comprise entre 20°C et 35°C. En présence d'oxygène, l'embryon émerge par l'apparition du coléoptile, d'où sortira la première feuille mais en condition anaérobie, la radicule (première racine) émerge la première du grain. Le stade germination débute avec l'apparition du coléoptile ou de la radicule et prend fin avec l'émergence de la première feuille. Cette première feuille se distingue par une anatomie peu différenciée et un bout arrondi (Lacharme, 2001).

Plantule (stade 1). Le stade plantule correspond à la période comprise entre l'émergence de la première feuille et l'apparition de la cinquième feuille. Chaque feuille est produite tous les 3 ou 4 jours. Pendant ce stade, long d'environ 14 jours, le jeune plant, fragile, présente un système racinaire peu développé et se nourrit essentiellement des réserves de la graine.

Tallage (stade 2). L'émission de tiges secondaires débute lorsque le plant arrive au stade 5 feuilles : c'est le tallage. Le nombre de talles augmente jusqu'à un certain seuil (tallage maximum) avant de décroître par la dégénérescence de certaines d'entre elles.

Elongation des entre-nœuds (stade 3). Vers la fin du tallage, les nœuds initialement très proches les uns des autres se séparent avec l'élongation des entre-nœuds. Il s'en suit une augmentation de la hauteur de la tige.

L'initiation paniculaire (IP) (stade 4). Ce stade marque le début de la phase reproductive et est caractérisée par la formation de la panicule. Dans les débuts, l'ébauche de la panicule est difficilement perceptible à l'œil nu puisqu'il faut attendre environ une dizaine de jours pour qu'elle mesure entre 1 et 1,5 mm. Dans la pratique, une coupe longitudinale de la tige permet de mettre en évidence ce jeune organe conique situé au sommet du dernier entre-nœud. Le nombre total d'épillets que portera la panicule est déjà fixé au stade de l'initiation paniculaire. La date de l'initiation paniculaire, chez le riz est conditionnée par beaucoup de facteurs tels

que la variété, les températures et la photopériode. Contrairement aux variétés à cycle long, l'initiation paniculaire intervient chez les variétés à cycle court pratiquement au même moment que le tallage maximum et l'élongation des entre-nœuds.

Montaison (stade 5). Ce stade est caractérisé par un gonflement à la base de la feuille paniculaire dû à une ascension de la panicule à l'intérieur de la gaine foliaire. Les différentes parties des épillets se développent au fur et à mesure que la panicule poursuit son ascension pour atteindre sa taille définitive avant son émergence de la feuille paniculaire.

Épiaison et floraison (stade 6). L'épiaison débute dès que le bout supérieur de la panicule s'aperçoit à la base de la feuille paniculaire. L'épiaison se déroule sur une période de deux semaines et prend fin avec la sortie totale de la panicule. La floraison commence trois jours après le début de l'épiaison et ensuite, les deux processus se poursuivent simultanément. La floraison est marquée par l'ouverture et l'épanouissement de la fleur. Elle se produit du sommet de la panicule vers la base. Chez le riz, la floraison se déroule généralement avant midi, entre 9 h et 11 h et l'autofécondation est la règle.

Grain laiteux (stade 7). Au stade grain laiteux, les panicules demeurent vertes et dressées. Au niveau de chaque épillet, l'ovaire fécondé se gonfle et le caryopse se développe pour atteindre sa taille maximum au bout de sept jours. Le contenu du grain en formation est d'abord aqueux avant de devenir laiteux.

Grain pâteux (stade 8). Le contenu laiteux du grain devient molle puis pâteux plus ou moins dure deux semaines après la floraison. La panicule s'assèche progressivement et, suivant la variété, sa couleur vire du vert au jaune paille ou noir. Le port de la panicule, initialement dressé, devient de plus en plus courbé.

Maturité (stade 9). Ce stade est atteint lorsque 85 à 90 % des grains de la panicule sont mûrs. A l'instar de la floraison, la maturation des grains commence du sommet de la panicule vers la base. Le grain mûr est dur au toucher et présente une coloration différente du vert. A ce stade, sa taille maximale ainsi que son poids maximal sont atteints. C'est la raison pour laquelle, la panicule est courbée.

1.4 Phases de développement de la plante

Les dix stades de développement du riz sont répartis en trois grandes phases (IRRI, 1985) (Figure 3) :

- la phase végétative, de la germination (stade 0) à élongation des entre-nœuds (stade 3) ;
- la phase reproductive, de l'initiation paniculaire (stade 4) jusqu'à la floraison (stade 6) ;
- la phase de maturité, du stade grain laiteux (stade 7) à la maturité complète (stade 9).

1.4.1 Phase végétative

Le plant ne développe que des organes végétatifs pendant la phase végétative. Sa durée dépend de la longueur de cycle des variétés et des paramètres climatiques tels que les températures basses et la photopériode. Les températures basses allongent la durée de la phase végétative. De même cette phase est plus longue chez les variétés de riz sensibles à la photopériode. L'essentiel des opérations agronomiques se déroule durant la phase végétative, notamment la fertilisation et les opérations de lutte contre les mauvaises herbes, les insectes et les maladies.

1.4.2 Phase reproductive

Pendant la phase reproductive, l'essentiel du fonctionnement de la plante est dirigé vers la formation et la maturation des organes reproducteurs. Les quatre stades phénologiques suivants sont regroupés au sein de la phase reproductive : initiation paniculaire, montaison, épiaison et floraison. La phase reproductive dure en moyenne entre 30 et 35 jours. Cette durée est moins influencée par la nature de la variété et les paramètres climatiques (notamment la température et la photopériode). Cependant des températures basses, un déficit hydrique et la salinité peuvent occasionner la stérilité des épillets, ce qui se traduit par des grains vides.

1.4.3 Phase de maturité

La phase de maturité concerne le processus de remplissage et de maturation du grain. Le grain passe successivement par les stades laiteux, pâteux avant d'atteindre la maturité définitive. La phase de maturité a une durée très peu variable d'environ 30 jours, quelles que soient la variété et la saison. Cette phase est particulièrement sensible aux températures élevées, aux vents violents et au déficit hydrique, surtout lorsque le grain est au stade pâteux (Wopereis *et al.*, 2008 ; ADRAO, 1986).

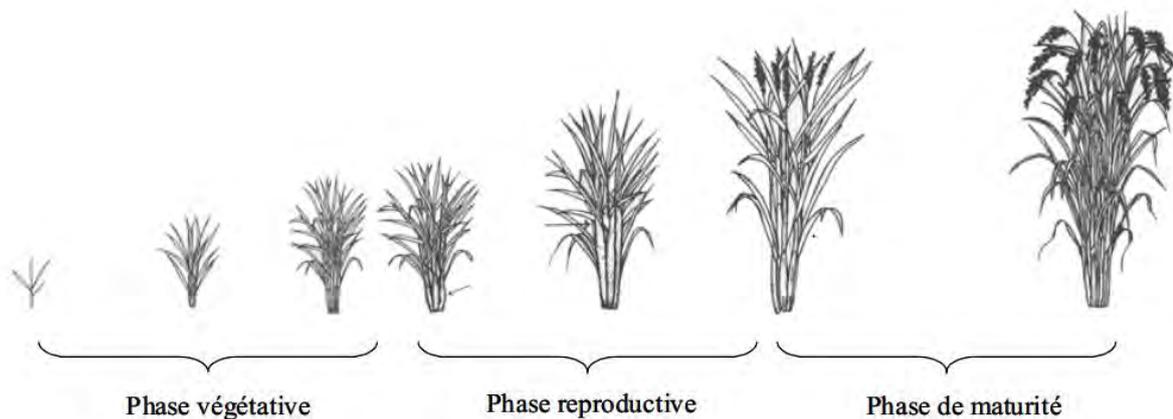


Figure 3 : Phases de développement du riz (Wopereis *et al.*, 2008)

1.5 Ecologie de la plante de riz

Le riz est une plante très plastique. Elle est cultivée dans des environnements très variés, du plateau à la mangrove, et des hauteurs des montagnes aux vallées intérieures très basses. On cultive également le riz aussi bien en conditions sèches qu'en milieu inondé. Il peut même survivre à une submersion totale pendant trois jours.

1.5.1 Exigences édaphiques du riz

Le riz pousse dans les sols les plus variés mais il préfère les sols à texture fine contenant environ 40 % d'argile, moyennement perméables, riches, meubles, limoneux à limono-argileux. Il a une grande tolérance à la salinité (1 ‰ au maximum) et préfère un pH optimum de 5 à 6,5 (Djiba et Coly, 2007). Le riz est extrêmement sensible à la disponibilité d'éléments nutritifs. La satisfaction quantitative et qualitative s'obtient par la restauration et l'amélioration de la composition chimique du sol destinée à sa culture d'une part et d'autre part par l'apport au sol, de façon régulière et rationnelle, des éléments indispensables à la nutrition du riz (azote, potassium, phosphore, sodium, calcium, etc.), dans le rapport correspondant à ses exigences. La fertilisation augmente la vigueur du riz, la récolte et la qualité (Djiba et Coly, 2007).

1.5.2 Exigences en chaleur

La plante de riz présente d'importants besoins en chaleur. Il faut des minima de 13°C pour la germination, 22°C pour la floraison et la pollinisation, 19°C pour la maturation. Une température moyenne comprise entre 22°C et 30°C est favorable à un bon développement végétatif (Angladette, 1966 ; Arraudeau et Vergara, 1992). Le riz est une plante exigeante en lumière. Pour un cycle de 120-130 jours, la somme des radiations solaires nécessaires

correspond à 1000 à 1200 heures d'ensoleillement, le minimum étant de 400 heures. Les rendements les plus élevés sont obtenus sous forte luminosité : $400 \text{ cal.j}^{-1}.\text{cm}^{-2}$. La plupart des variétés traditionnelles de riz sont sensibles à la photopériode contrairement aux nouvelles variétés.

1.5.3 Exigences en eau

Le riz est une plante exigeante en eau. En culture pluviale, les besoins hydriques du riz dépendent du cycle de la variété cultivée et du climat local qui régit l'importance de la transpiration de la plante. Ces besoins sont généralement compris entre 450 mm pour les variétés à cycle court et 650 mm pour les variétés à cycle long (Angladette, 1966 ; Arraudeau et Vergara, 1992). Cependant compte tenu des diverses formes de pertes d'eau en condition de culture sous pluie, certains auteurs pensent qu'il est hasardeux de cultiver le riz sous les isohyètes inférieures à 1000 mm (Mayer et Bonnefond, 1973). Il demeure néanmoins possible que la culture du riz pluvial soit un succès dans des zones ayant une pluviosité minimale de 800 mm (Dembélé *et al.*, 2005) voire 700 mm avec des variétés hâtives (cycle semis-maturité inférieur ou égal à 95 jours) lorsque le semis est bien calé sur la saison humide (Séré *et al.*, 1994). En plus de la notion de quantité d'eau nécessaire pour assurer son cycle de développement complet, la régularité des apports d'eau à la plante de riz doit être prise en compte. En effet, les besoins en eau du riz varient au cours de son cycle : faibles au moment des semis, ils augmentent d'abord jusqu'à la montaison et diminuent ensuite pour devenir presque nuls après la phase de maturité pâteuse. Ainsi, en fonction de la période de survenue d'une période de sécheresse, de son intensité et de sa durée, le rendement du riz peut être gravement affecté (Mayer et Bonnefond, 1973).

Chapitre 2 : Performances agronomiques de variétés de riz pluvial de plateau dans différentes zones agroécologiques au Sénégal

Une partie de ce chapitre a été publiée sous forme d'article scientifique le 31 mars 2016 dans le numéro 99 de la revue «Journal of Applied Biosciences (ISSN 1997-5902)» sous le titre «Performances agronomiques de quatre variétés de riz pluvial NERICA de plateau semées à différentes dates en zone soudano-sahélienne au Sénégal» (Annexe 1).

2.1 Introduction

Le riz est une denrée prépondérante dans l'alimentation sénégalaise tant en milieu urbain qu'en milieu rural (Kite, 1993 ; Kelly *et al.*, 1993). Il représente 36% du volume céréalier national consommé par an devant le mil (26%) et le maïs (18%) (Del Villar *et al.*, 2011). La consommation annuelle de riz par habitant oscille entre 80 kg et 100 kg (FAO, 2011 ; Dieng *et al.*, 2011) et la consommation nationale est estimée à 1 million de tonnes par an (Seck, 2015 ; Brüntrup *et al.*, 2006 ; PNAR, 2009). Malheureusement, le Sénégal est à 80% dépendant des importations pour satisfaire sa demande intérieure en riz. Ce qui représente une sortie de devises estimée à 130 milliards de FCFA par an et correspond à 16% du déficit de la balance commerciale (Seck, 2015 ; PNAR, 2009). Les autorités sénégalaises et les partenaires au développement ont mis en œuvre depuis ces deux dernières décennies des programmes visant à réduire la dépendance du pays vis-à-vis du riz importé (APRAO, 2012 ; ENDA DIAPOL, 2010) et même à être autosuffisant en riz. Parmi les stratégies adoptées, l'accent a été mis sur le développement de la riziculture pluviale dans les zones sud, centre et est du pays. Dans ces régions, les superficies cultivées ont connu une extension et des variétés améliorées, mises au point par la recherche agronomique, ont été distribuées aux producteurs (APRAO, 2012 ; FAO, 2011). Au nombre de celles-ci, des variétés de riz NERICA de plateau connaissent un certain succès notamment grâce à leur rusticité, à leur précocité et à leur productivité. Le paysage rizicole est aussi caractérisé par la présence de variétés de riz directement adoptées par les paysans à partir de pays voisins du Sénégal, en dehors du circuit officiel d'approvisionnement en semences. Toute cette dynamique de diffusion de ces variétés de riz et de l'extension du front rizicole pluvial s'est faite ces dernières années en dépit d'une absence d'études scientifiques préliminaires. Pourtant les nouvelles zones rizicultivées, en particulier celles du centre et certaines parties de la zone orientale du Sénégal, sont

régulièrement sujettes à des périodes de déficit hydrique dues à la date souvent aléatoire de démarrage de la saison pluvieuse, aux pauses pluviométriques au cours du cycle cultural et aux sécheresses de fin de cycle. De plus, les zones centrales et orientales du pays sont soumises à un climat soudano-sahélien caractérisé par une pluviométrie annuelle variant entre 600 mm et 800 mm (Salack *et al.*, 2011 ; Sarr *et al.*, 2011) alors que l'on considère qu'il est hasardeux de cultiver du riz pluvial dans une localité n'enregistrant pas plus de 800 mm de pluie par an (Mayer et Bonnefond, 1973 ; Sié, 1997 ; Dembélé *et al.*, 2005). L'on peut dès lors s'interroger sur les précautions à prendre dans le choix des variétés de riz pour réussir la riziculture pluviale dans ces zones. La présente étude évalue les performances agronomiques de différentes variétés de riz pluvial de plateau aux caractéristiques contrastées dans les différentes zones agroécologiques de culture du riz pluvial au Sénégal en vue d'identifier le profil des variétés dédiées à chaque environnement et celui des variétés stables quel que soit l'environnement de culture.

2.2 Matériels et méthode

2.2.1 Sites expérimentaux

2.2.1.1 Présentation générale

25 essais ont été conduits en 5 stations de recherche de l'Institut Sénégalais de Recherches Agricoles (ISRA) et en 9 sites paysans (soit un total de 14 sites) (Figure 4) de 2012 à 2014 dans trois zones agroécologiques du Sénégal (Bassin arachidier, Sénégal oriental et Casamance) pour évaluer le comportement de diverses variétés de riz pluvial de plateau (Tableau I). Au nombre de ces essais, 14 ont été affectés par des contraintes diverses : attaques de termites, attaques de nématodes, sécheresse, etc. Ainsi, seules les données de 11 essais étaient exploitables. Ces essais retenus ont été conduits dans quatre stations de recherche de l'ISRA et en un site paysan. Les essais en station ont été implantés à Darou Pakathiar (Bassin arachidier), Sinthiou Malème (Sénégal oriental), Kolda (Haute Casamance) et Séfa (Moyenne Casamance). L'expérimentation en milieu paysan était localisée à N'Dama, dans le Bassin arachidier, non loin de Nioro du Rip. La description des sites expérimentaux se limitera aux cinq sites ayant permis d'obtenir des données exploitables.

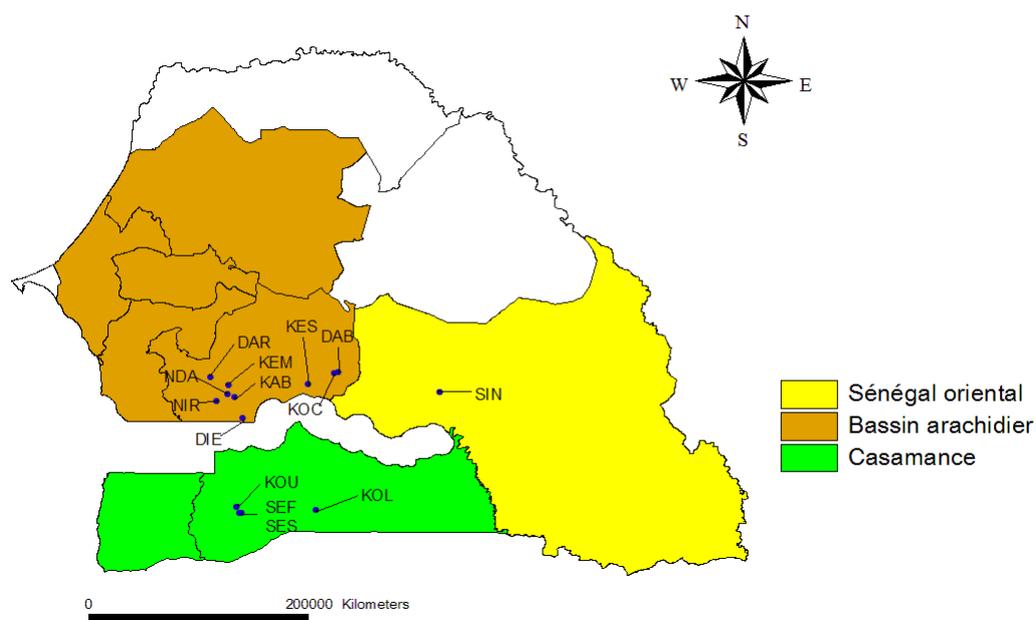


Figure 4 : Localisation des sites des essais. *DAB* : Darou Bambara ; *DAR* : Darou Pakathiar ; *DIE* : Diéricao ; *KAB* : Kabacoto ; *KEM* : Keur Moulaye ; *KES* : Keur Samba ; *KOC* : Koungheul Campement ; *KOL* : Kolda ; *KOU* : Koussy 3 ; *NDA* : N'Dama ; *NIR* : Nioro du Rip ; *SEF* : Séfa ; *SES* : Séfa Soukoutoto ; *SIN* : Sinthiou Malème.

Tableau I : Caractéristiques des sites des essais au cours des années 2012, 2013 et 2014. Les sites sont rangés par latitude décroissante. Les chiffres sous les années correspondent au nombre d'essais et les astérisques (*) indiquent que les données des essais étaient exploitables

| site | Zone agroécologique | Latitude (°) | Longitude (°) | Isohyète (mm) | Nombre d'essais | | |
|---------------------|---------------------|--------------|---------------|---------------|-----------------|------|------|
| | | | | | 2012 | 2013 | 2014 |
| Darou Bambara | Bassin arachidier | 14,00 | -14,77 | 600-700 | | | 1 |
| Koungheul Campement | Bassin arachidier | 13,99 | -14,80 | 600-700 | | 1 | 1 |
| Darou Pakathiar | Bassin arachidier | 13,96 | -15,84 | 600-700 | 1* | 1* | 1 |
| Keur Samba | Bassin arachidier | 13,90 | -15,02 | 600-700 | | | 1 |
| Keur Moulaye | Bassin arachidier | 13,89 | -15,69 | 600-700 | | | 1 |
| Sinthiou Malème | Sénégal oriental | 13,83 | -13,91 | 600-700 | 1* | 1* | 1* |
| N'Dama | Bassin arachidier | 13,82 | -15,70 | 600-700 | | 1 | 1* |
| Kabacoto | Bassin arachidier | 13,79 | -15,64 | 600-700 | | | 1 |
| Nioro du Rip | Bassin arachidier | 13,76 | -15,79 | 600-700 | 2 | | |
| Diéricao | Bassin arachidier | 13,62 | -15,57 | 700-800 | | | 1 |
| Koussy 3 | Casamance | 12,88 | -15,62 | 1000-1100 | | | 1 |
| Kolda | Casamance | 12,86 | -14,95 | 900-1000 | 1* | 1* | 1* |
| Séfa | Casamance | 12,83 | -15,59 | 1000-1100 | 1* | 1* | 1 |
| Séfa Soukoutoto | Casamance | 12,83 | -15,58 | 1000-1100 | | | 1 |

*: essai ayant permis d'avoir des données exploitables

2.2.1.2 Caractéristiques édaphiques des sites d'étude

Des prélèvements d'échantillons composites de sol ont été effectués à trois niveaux d'horizon (0-10 cm ; 10-20 cm et 20-30 cm) avant l'installation des essais et ont été analysés au laboratoire du CNRA de Bambey pour la détermination des paramètres physico-chimiques majeurs modulant l'alimentation hydrominérale des plants mis en essais. Ces échantillons de sol ont été prélevés à Darou Pakathiar, Sinthiou Malème, Kolda et Séfa au cours des années 2013 et 2014 (Annexe 2). Sur chaque site, les parcelles des essais n'étaient guère distantes les unes des autres d'une année à l'autre. L'on a donc décidé d'extrapoler les résultats, pour un même site, aux années pour lesquelles les résultats d'analyses de sol ne sont pas disponibles. Les analyses de sol ont porté sur la granulométrie, le pH, la teneur en carbone et en azote des sols.

2.2.1.3 Caractéristiques climatiques des sites d'étude

Des stations météorologiques automatiques de type TINYTAG (© Gemini Data Loggers) permettant l'enregistrement de la pluviométrie et des températures minimale, moyenne et maximale journalières ont été installées sur tous les sites des essais conduits en station de recherche (Darou Pakathiar, Sinthiou Malème, Kolda et Séfa). Sur les sites paysans (en particulier à N'Dama), les pluviométries ont été enregistrées à l'aide de pluviomètres manuels à lecture directe. A partir de ces données climatiques collectées, des paramètres additionnels ont été calculés. Ainsi, les dates de début, de fin et de durée de la saison des pluies ont été déterminées suivant les critères de Sivakumar (1988). Selon cet auteur, la date de début de la saison pluvieuse correspond au premier jour après le 1^{er} mai où la pluie cumulée avec celle des deux jours précédents atteint une hauteur minimale de 20 mm sans qu'il soit suivi pendant les 30 jours suivants d'une pause pluviométrique de plus de 7 jours. La date de fin de la saison des pluies correspond quant à elle au jour après le 1^{er} septembre à partir duquel il n'y a plus de pluie utile pendant deux décades. La différence entre les dates de fin et de début de la saison des pluies permet d'obtenir sa durée.

2.2.2 Matériel végétal

Sur les trois années d'essais, 24 variétés de riz ont été semées (Tableau II) au nombre desquelles figuraient 11 variétés hybrides NERICA, 9 variétés asiatiques (dont deux parents des NERICAs pluviaux (WAB 56-50 et WAB 181-18)) et 4 variétés hybrides autres que des NERICAs mais obtenues par croisements entre *Oryza sativa* et *Oryza glaberrima* (DKA P2,

DKA P3, DKA P17 et FKR 45 N). Parmi les 24 variétés de riz mises en essais, 6 ont déjà été homologuées au Sénégal et figurent au catalogue officiel des variétés de riz pluvial : deux hybrides NERICAs (NERICA 1 et NERICA 6) et 4 *O. sativa* (WAB 56-50, DJ11 509, IRAT10 et ITA 150). Selon la longueur du cycle, les variétés pouvaient être classées en deux groupes : le groupe des variétés très précoces avec un cycle de 75-85 jours et le groupe des variétés moyennement précoces avec un cycle de 90-100 jours. Les variétés très précoces étaient au nombre de quatre, toutes des NERICAs : NERICA 8, NERICA 9, NERICA 11 et NERICA 14. Les variétés étudiées provenaient du Sénégal, d’AfricaRice Bénin, du Mali, du Burkina Faso et du Nicaragua (Tableau II) Elles ont été choisies car elles étaient conseillées par AfricaRice et les systèmes nationaux de recherche agronomique comme pouvant bien se comporter a priori dans nos écologies, et en tenant compte de la diversité de leurs caractéristiques. La disponibilité en semences a aussi parfois joué dans leur choix.

Au cours de l’année 2012, 20 variétés de riz pluvial constituaient le matériel végétal mis en essais. Les résultats de la première année ont permis de retirer certaines variétés et de les remplacer par d’autres potentiellement meilleures pour les expérimentations de l’année 2013. Ainsi, WAB 638-1 (mieux adaptée à l’écologie de bas-fonds), NERICA 16, DKA P2 et DKA P17 ont été remplacées par WAB C165, NERICA 13, INTA FORTALEZA et FKR 45 N. Dix des meilleures variétés sur les deux premières années d’expérimentation ont été retenues pour la conduite des essais en 2014 (Tableau II).

L’acquisition des semences n’a toujours pas été aisée vu les quantités dont nous avons besoin pour nos essais. Dans certains cas, les semences étaient obtenues tardivement, quelques jours avant les dates de semis. Cette contrainte n’a pas rendu possible les tests de germination sur toutes les semences avant les semis. Il s’est alors avéré, après les semis, que certaines semences n’étaient pas de bonne qualité et elles n’avaient pas levé sur tous les sites (Tableau II).

Tableau II : Variétés de riz étudiées au cours des années 2012, 2013 et 2014 (AfricaRice, 2008 ; IER, 2009 ; CNS, 2014 ; ISRA, 2012 ; INTA, 2011)

| N° | Nom de la variété | Code de la variété | Origine des semences | Espèce | Groupe | Cycle semis-maturité (j) | Hauteur (cm) | Rendement grains (t.ha-1) | Poids de mille grains (g) | HSEN* | 2012 | 2013 | 2014 |
|-----------------------|-------------------|--------------------|----------------------|----------------------------------|----------------|--------------------------|--------------|---------------------------|---------------------------|-------|------|------|------|
| Hybride NERICA | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | NERICA 1 | N1 | Sénégal | <i>O. sativa x O. glaberrima</i> | hybride NERICA | 95-100 | 100 | 4.5 | 29.0 | X | X | X | X |
| 2 | NERICA 4 | N4 | AfricaRice | <i>O. sativa x O. glaberrima</i> | hybride NERICA | 95-100 | 120 | 5.0 | 29.0 | | X | X | X |
| 3 | NERICA 6 | N6 | Sénégal | <i>O. sativa x O. glaberrima</i> | hybride NERICA | 95-100 | 130 | 5.0 | 29.0 | X | X | X | |
| 4 | NERICA 8 | N8 | AfricaRice | <i>O. sativa x O. glaberrima</i> | hybride NERICA | 75-85 | 100 | 5.0 | 29.0 | | X | X | X |
| 5 | NERICA 9 | N9 | AfricaRice | <i>O. sativa x O. glaberrima</i> | hybride NERICA | 75-85 | 105 | 5.0 | 33.0 | | X | X | |
| 6 | NERICA 11 | N11 | AfricaRice | <i>O. sativa x O. glaberrima</i> | hybride NERICA | 75-85 | 105 | 7.0 | 28.4 | | X | X | X |
| 7 | NERICA 12 | N12 | AfricaRice | <i>O. sativa x O. glaberrima</i> | hybride NERICA | 90-100 | 115 | 5.5 | 36.8 | | X | o | X |
| 8 | NERICA 13 | N13 | AfricaRice | <i>O. sativa x O. glaberrima</i> | hybride NERICA | 90-100 | 120 | 6.0 | 32.9 | | | o | |
| 9 | NERICA 14 | N14 | AfricaRice | <i>O. sativa x O. glaberrima</i> | hybride NERICA | 75-85 | 110 | 5.0 | 33.6 | | X | X | X |
| 10 | NERICA 16 | N16 | AfricaRice | <i>O. sativa x O. glaberrima</i> | hybride NERICA | 90-100 | 130 | 6.0 | 29.2 | | o | | |
| 11 | NERICA 17 | N17 | AfricaRice | <i>O. sativa x O. glaberrima</i> | hybride NERICA | 90-100 | 115 | 6.5 | 35.1 | | X | o | X |
| Oryza sativa | | | | | | | | | | | | | |
| 12 | DJ11-509 | J11 | Sénégal | <i>O. sativa</i> | indica | 100 | 90 | 4.5 | 25.0 | X | X | X | |
| 13 | INTA FORTALEZA | F | Nicaragua | <i>O. sativa</i> | japonica | 90-95 | 109 | 5.0 | 32.2 | | | X | X |
| 14 | IRAT 10 | RA | Sénégal | <i>O. sativa</i> | indica | 100 | 100 | 5.5 | 26.0 | X | X | o | |
| 15 | ITA 150 | IT | Sénégal | <i>O. sativa</i> | japonica | 100 | 130 | 3.5 | 36.4 | X | X | X | |
| 16 | WAB 181-18 | W1 | Mali | <i>O. sativa</i> | japonica | 95 | 110 | 4.5 | 27.4 | | X | X | |
| 17 | WAB 189 | W9 | Mali | <i>O. sativa</i> | japonica | 95 | 120 | 4.0 | 32.5 | | X | X | |
| 18 | WAB 56-50 | W5 | Sénégal | <i>O. sativa</i> | japonica | 100 | 118 | 3.5 | 26.7 | X | X | X | |
| 19 | WAB 638-1 | WA | AfricaRice | <i>O. sativa</i> | japonica | 135 | 115 | 5.0 | 29.0 | | <> | | |
| 20 | WAB C165 | W6 | Burkina Faso | <i>O. sativa</i> | japonica | 90 | 100 | 3.5 | 31.0 | | | X | X |
| Autre hybride | | | | | | | | | | | | | |
| 21 | DKA P2 | D2 | Mali | <i>O. glaberrima x Nerica 4</i> | hybride | 95-100 | 100 | 4.5 | 29.0 | | X | | |
| 22 | DKA P3 | D3 | Mali | <i>O. glaberrima x Nerica 4</i> | hybride | 95-100 | 100 | 4.5 | 29.0 | | X | X | |
| 23 | DKA P17 | D17 | Mali | <i>O. glaberrima x Nerica 4</i> | hybride | 95-100 | 100 | 4.5 | 29.0 | | X | | |
| 24 | FKR 45N | K | Burkina Faso | <i>O. sativa x O. glaberrima</i> | hybride | 95 | 100 | 3.5 | 34.3 | | | X | X |

*HSEN: variétés homologuées au Sénégal et figurant au catalogue officiel des variétés de riz pluvial

X: les données de ces variétés ont été exploitées

o: les plants n'ont pas levé

<>: variété mieux adaptée à l'écologie de bas-fonds

2.2.3 Dispositifs expérimentaux

Le dispositif expérimental en 2012 et en 2013 était un alpha lattice composé de 4 blocs de 5 parcelles avec 3 répétitions. Une distance de 0,5 m séparait deux parcelles proches et un espace de 1 m était laissé entre les répétitions. La parcelle élémentaire avait une longueur de 3 m et une largeur de 2,5 m soit une superficie de 7,5 m². Un espace de 2 m a été laissé tout autour de l'essai. La longueur totale du dispositif était alors de 57 m et la largeur de 15,5 m, soit une superficie totale de 883,5 m². La parcelle élémentaire était composée de 10 lignes de 15 poquets avec un carré de rendement formé à partir des 42 poquets centraux (7 lignes de 6 poquets). L'écartement était de 25 cm entre les lignes et 20 cm entre poquets d'une même ligne. Le carré de rendement avait alors une superficie de 2,1 m².

En 2014, les essais ont été conduits suivant un dispositif en blocs de Fisher complètement randomisés comportant quatre répétitions pour le site de Sinthiou Malème et trois répétitions pour les autres sites. Les distances entre parcelles proches et entre répétitions de même que la géométrie de semis étaient identiques à celles des années antérieures. Cependant, la parcelle élémentaire mesurait 4 m de côté pour une superficie de 16 m². L'essai avait donc une longueur maximale de 41 m et une largeur de 26 m, soit une superficie totale de 1066 m². Chaque parcelle élémentaire était constituée de 320 poquets parmi lesquels les 100 poquets centraux (10 lignes x 10 poquets) formaient le carré de rendement de 5 m².

2.2.4 Conduite des essais

Tous les essais ont été conduits en condition d'alimentation hydrique strictement pluviale. Pour chacun des essais, les travaux de préparation de terrain ont consisté en un labour aux disques suivi d'un hersage. La géométrie de semis adoptée était de 0,25 m entre les lignes et 0,20 m entre les poquets d'une même ligne, soit une densité de 200 000 poquets.ha⁻¹. Sur chaque site, les semis ont été effectués après la date d'installation de la saison des pluies (Tableau III), à raison de 8 à 10 grains par poquet. Les plants ont été démariés à trois pieds par poquet, en condition humide, avant le tallage. Des désherbages manuels ont été effectués au besoin pour maintenir les plants en situation de non compétition avec les adventices. Des applications de carbofuran (Furadan) ont été administrées, au semis et au besoin, pour contrôler les attaques de déprédateurs, dont en particulier les termites. Les fertilisations chimiques ont été effectuées conformément aux recommandations de la recherche agronomique au Sénégal qui consistent en un épandage d'engrais N-P-K (15-15-15) à la dose de 200 kg.ha⁻¹ au semis et en un apport de 150 kg.ha⁻¹ d'urée (46% N) à raison de 100 kg.ha⁻¹

à début tallage et de 50 kg.ha⁻¹ à début épiaison. Des diguettes anti-érosives ont été aménagées tout autour des essais pour limiter le ruissellement de l'eau de pluie au sein et entre les parcelles.

Tableau III · Dates de semis des essais en fonction du site expérimental et de l'année d'étude

| Site | Zone agroécologique | Latitude | Longitude | Date de semis | | |
|-----------------|---------------------|----------|-----------|---------------|------------|------------|
| | | | | 2012 | 2013 | 2014 |
| Darou Pakathiar | Bassin arachidier | 13.96 | -15.84 | 20 juillet | 17 juillet | |
| Sinthiou Malème | Sénégal oriental | 13.83 | -13.91 | 17 juillet | 21 juillet | 25 juillet |
| Ndama | Bassin arachidier | 13.82 | -15.70 | | | 11 août |
| Kolda | Casamance | 12.86 | -14.95 | 21 juillet | 10 juillet | 1er août |
| Séfa | Casamance | 12.83 | -15.59 | 23 juillet | 13 juillet | |

Seuls les 11 essais (sur un total de 25) ayant permis d'obtenir des données exploitables sont présentés dans ce tableau. Les informations concernant les autres essais se trouvent au tableau I.

2.2.5 Paramètres agronomiques mesurés et calculés

Les paramètres agronomiques suivants ont été mesurés ou calculés au cours des différents essais (Tableau IV): la durée de cycle semis-début floraison mâle (DSF) (50% des plantes à début floraison mâle), la durée de cycle semis-maturité (DSM) (50% des plantes à maturité), la hauteur des plants (HAUT), le nombre total de talles par mètre carré à la récolte (TAL), le nombre de panicules par mètre carré à la récolte (PANI), le taux de talles infertiles (INFERT) (sans panicule), le rendement grains (RDTG), le rendement paille (RDTP), l'indice de récolte (IR), le nombre d'épillets par panicule (EPIL), le nombre d'épillets vides par panicule (EPV), le taux de stérilité (STERIL) et le poids de mille grains (PMG).

Tableau IV : Paramètres suivis au cours des essais

| Abréviation | Définition | Unité |
|-------------|---|---------------------|
| DSF | Durée de cycle semis-floraison | °C.j |
| DSM | Durée de cycle semis-maturité | °C.j |
| HAUT | Hauteur des plants à la récolte | cm |
| TAL | Nombre de talles à la récolte | m ⁻² |
| PANI | Nombre de panicules à la récolte | m ⁻² |
| INFERT | Taux de talles infertiles | % |
| RDTG | Rendement grains | kg.ha ⁻¹ |
| RDTP | Rendement paille | kg.ha ⁻¹ |
| IR | Indice de récolte | - |
| EPIL | Nombre d'épillets par panicule | - |
| STERIL | Taux de stérilité des épillets par panicule | % |
| PMG | Poids de mille grains | g |

2.2.5.1 Durée de cycle

6 poquets situés aux abords du carré de rendement ont été retenus pour l'observation des stades floraison et maturité. Ces stades phénologiques ont été déterminés sur la base de l'échelle BBCH qui stipule que le stade phénologique d'une plante est celui atteint par sa tige principale (BBCH, 2001 ; Witzemberger *et al.*, 1989 ; Lancashire *et al.*, 1991). La durée de cycle semis-floraison est le temps qu'il faut, après le semis, pour atteindre le début de la floraison mâle de 50% des poquets observés (3 sur 6). Le stade maturité est atteint lorsque les grains des panicules sont durs et difficiles à couper en deux avec l'ongle (code 89 de l'échelle BBCH). Les durées de cycle semis-floraison (DSF) et semis-maturité (DSM) ont été exprimées en jours et également en sommes de températures qui ont été calculées à partir de la formule suivante (Yoshida, 1981 ; Alcocilja et Ritchie, 1988):

$$DC = \sum_{i=0}^n \left(\frac{T_{\min_i} + T_{\max_i}}{2} - T_b \right)$$

(DC : durée de cycle (DSF ou DSM) ; n : nombre de jours après le semis pour atteindre le stade floraison ou le stade maturité ; T_{min} : température minimale journalière ; T_{max} : température maximale journalière ; T_b : température de base). La température de base du riz

est la température en dessous de laquelle la germination et la croissance du riz sont impossibles. Elle a été prise égale à 13 °C (Angladette, 1966 ; Sié, 1997).

2.2.5.2 Hauteur des plants

La mesure de hauteur a été effectuée à la récolte sur les six poquets retenus pour l'observation des stades phénologiques. La hauteur (en cm) correspondant à une parcelle est la moyenne des mesures effectuées sur les six poquets depuis la base des plants jusqu'au sommet de la plus haute panicule.

2.2.5.3 Rendement et indice de récolte

Pour tous les essais, les grains de riz ont été récoltés à maturité et la production du carré de rendement a été pesée après battage, ainsi que la biomasse aérienne du carré. Cette biomasse était constituée de talles, de feuilles et de la paille des panicules obtenue après battage. Les grains et la biomasse ont été pré-séchés à l'air en serre avant un séjour final à l'étuve à 65°C pendant une durée de 72 h ; ce qui a permis de calculer le rendement grains en kg.ha⁻¹ ajusté à 14% d'humidité (RDTG) (Yoshida, 1981 ; Alocilja et Ritchie, 1988) et le rendement paille (RDTP) (en kg.ha⁻¹) à 0% d'humidité. L'indice de récolte (IR) a été calculé suivant la formule ci-après, RDTG et RDTP étant maintenus à 0% d'humidité :

$$IR = \frac{RDTG}{RDTG + RDTP}$$

2.2.5.4 Composantes du rendement

A la récolte, on a procédé au comptage des poquets, talles et panicules du carré de rendement. Ce qui a permis de déterminer le nombre de talles au mètre carré (TAL), le nombre de panicules au mètre carré (PANI) et le taux de talles infertiles (INFERT) c'est-à-dire sans panicule.

$$INFERT = 100 \frac{TAL - PANI}{TAL}$$

En sus les panicules de cinq poquets du carré de rendement (choisis de façon aléatoire) ont été étudiées pour la détermination du poids de mille grains (PMG), du nombre total d'épillets par panicule (EPIL) et du nombre d'épillets vides par panicule (EPV). Le taux de stérilité (STERIL) a été calculé comme suit :

$$STERIL = 100 \frac{EPV}{EPIL}$$

2.2.6 Traitement et analyse de données

Dans un premier temps, des analyses de la variance ont été effectuées sur les données de chaque année prise séparément. Les tests ont porté sur l'effet du site, de la variété et de l'interaction de ces deux facteurs sur les paramètres étudiés. Pour ce faire, le dispositif en split plot a été considéré, le site étant le facteur principal et la variété, le facteur secondaire. Deuxièmement, l'effet de l'année a été pris en compte sur les variétés qui ont été étudiées sur les trois années d'essais. Le dispositif en split-split-plot a alors été considéré, l'année de l'essai constituant le facteur principal, le site, le premier facteur secondaire et la variété, le second facteur secondaire.

Les analyses statistiques ont été effectuées sur toutes les variables étudiées à l'exception de celles portant sur la phénologie. Ces analyses ont été effectuées à l'aide du logiciel R version 3.0.2 (R Core Team, 2013). Le test de Shapiro-Wilk (Shapiro and Wilk, 1965) a permis de vérifier la distribution normale des données et le test de Bartlett (Bartlett, 1937) a été utilisé pour tester l'égalité des variances. Lorsque les conditions de normalité et d'homoscédasticité n'étaient pas satisfaites, le test non paramétrique de Kruskal-Wallis a permis de poursuivre les analyses. Toutes les analyses de variance ont été effectuées au seuil de significativité de 5%. En cas de différence significative, les comparaisons multiples de moyennes ont été réalisées grâce au test de Tukey (Tukey, 1949). Le logiciel XLSTAT version 2014.5.03 (© 2013 Addinsoft) a été utilisé pour effectuer les analyses multi-variées.

2.3 Résultats

2.3.1 Caractéristiques des sols des essais

Une analyse en composantes principales a été réalisée sur ces paramètres. Les axes F1 et F2 expliquent 67% de la variabilité entre les prélèvements de sols étudiés. L'axe F1 est corrélé à la composition en sable total et au pH et l'axe F2 est corrélé au taux d'argile et à la teneur en azote (Figure 5). A Darou Pakathiar, les sols sont neutres à légèrement basiques contrairement à ceux des autres sites, qui sont tous acides et dont le pH oscille entre 5,20 et 6. Les sols de Darou Pakathiar contiennent de fortes proportions de sable (plus de 90%) quel que soit l'horizon échantillonné. Les sols des autres sites sont à dominance sableuse (entre 80 et 90%) mais l'horizon intermédiaire 10-20 cm contient des proportions plus élevées d'argile et de

limon comparativement aux horizons superficiel (0-10 cm) et plus profond (20-30 cm). Les sols de Sinthiou Malème, Kolda et Séfa contiennent des teneurs plus élevées d'azote comparativement à ceux de Darou Pakathiar. Les sols de Darou Pakathiar sont en définitive légèrement basiques, très filtrants et pauvres alors que ceux des autres sites sont acides et relativement plus riches en azote.

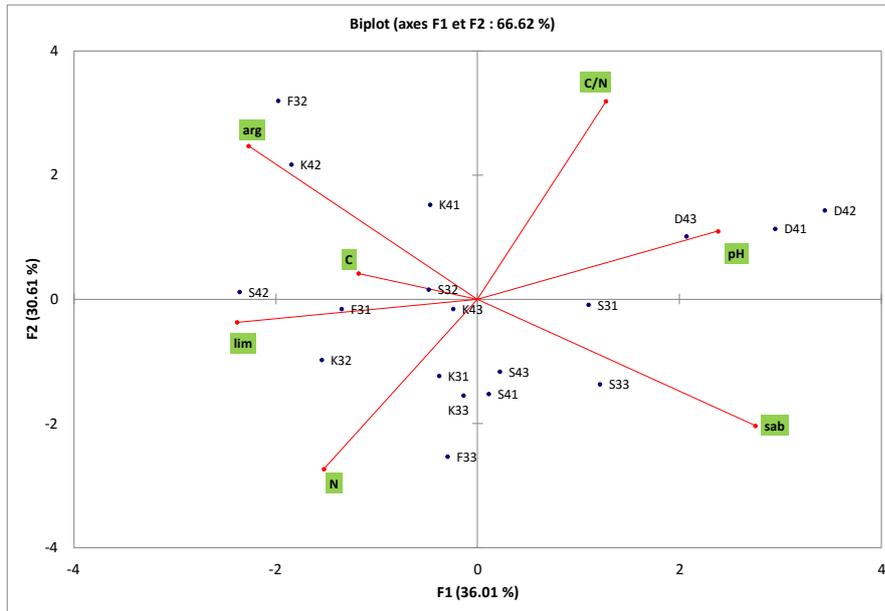


Figure 5 : Analyse en composantes principales montrant les caractéristiques des sols des sites étudiés. *arg* : pourcentage d'argile ; *C* : teneur en carbone ; *C/N* : rapport C/N ; *limon* : pourcentage de limon ; *pH* : pH ; *N* : teneur en azote ; *sab* : pourcentage de sable. *D* : Darou Pakathiar, *F* : Séfa ; *K* : Kolda ; *S* : Sinthiou Malème. Les chiffres derrière les lettres renseignent respectivement sur l'année (3 pour 2013 et 4 pour 2014) et le niveau de prélèvement (1 pour 0-10 cm, 2 pour 10-20 cm et 3 pour 20-30 cm).

2.3.2 Températures enregistrées au cours des essais

Les températures enregistrées au cours de la période couverte par les expérimentations (entre le mois de juillet et la fin du mois d'octobre) sont demeurées similaires sur chaque site quelle que soit l'année d'étude. L'on a cependant noté que les températures étaient légèrement plus élevées de 1 à 2°C sur les sites de Darou Pakathiar et Sinthiou Malème que sur ceux de Kolda et Séfa. Dans l'ensemble, les températures maximales journalières ont oscillé entre 31°C et 37°C et les températures minimales journalières avaient des valeurs comprises entre 22°C et 26°C. Les amplitudes thermiques journalières moyennes étaient plus élevées à Darou Pakathiar et à Sinthiou Malème (entre 10°C et 12°C) qu'à Kolda et à Séfa (entre 8°C et 10°C) (Figure 6).

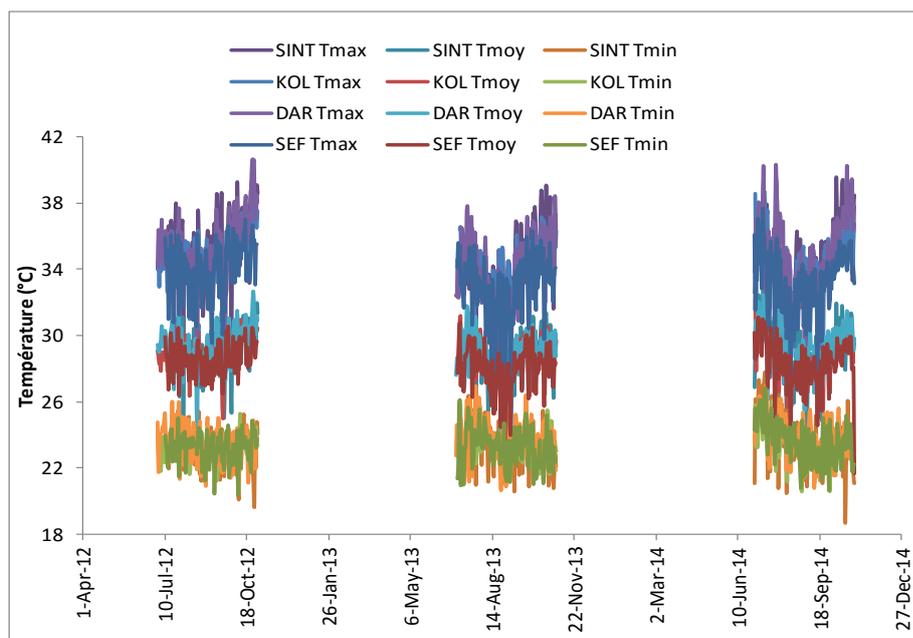


Figure 6 : Températures maximale (Tmax), moyenne (Tmoy) et minimale (Tmin) enregistrées à Darou Pakathiar (DAR), Sinthiou Malème (SINT), Kolda (KOL) et Séfa (SEF) au cours des années 2012, 2013 et 2014.

2.3.3 Caractéristiques de la pluviométrie

Une analyse en composantes principales a été effectuée pour caractériser les sites sur la base du début, de la fin et de la durée de la saison des pluies, de la pluviométrie annuelle enregistrée, de la hauteur de pluie reçue par les plantes, du nombre total de jours de pluie annuel et du nombre de jours de pluie enregistré au cours des essais (Annexe 3). Ces paramètres ont été résumés par deux axes F1 et F2 qui rendent compte de 94% des informations initiales renseignées. L'axe F1 traduit le degré d'humidité du site puisqu'il est corrélé aux paramètres liés à la pluviosité et au nombre de jours de pluies. L'axe F2 est plutôt corrélé à la durée de la saison pluvieuse (Figure 7). Il ressort que les années d'essais ont suivi un gradient décroissant d'humidité : l'année 2012 a été la plus humide suivie de l'année 2013. L'année 2014 a été la plus sèche de toutes les années d'essais. Au cours de cette troisième année d'essai, la saison des pluies a démarré plus tardivement, les volumes pluviométriques ainsi que le nombre de jours de pluies enregistrés étaient les plus faibles sur les trois années. En plus de cette tendance générale, quelques particularités ont été notées sur certains sites. Ainsi, la variabilité pluviométrique a été moindre sur les sites de Darou Pakathiar et Séfa que sur ceux de Sinthiou Malème et Kolda. La saison des pluies a eu une durée exceptionnellement plus longue à Séfa pendant l'année 2013 comparativement aux données

enregistrées durant les trois années d'essais sur tous les sites étudiés. A l'exception de l'année 2013, les sites du sud (Kolda et Séfa) ont été plus humides que ceux situés au nord (Darou Pakathiar et Sinthiou Malème) de la zone géographique couvrant nos essais (Figure 7).

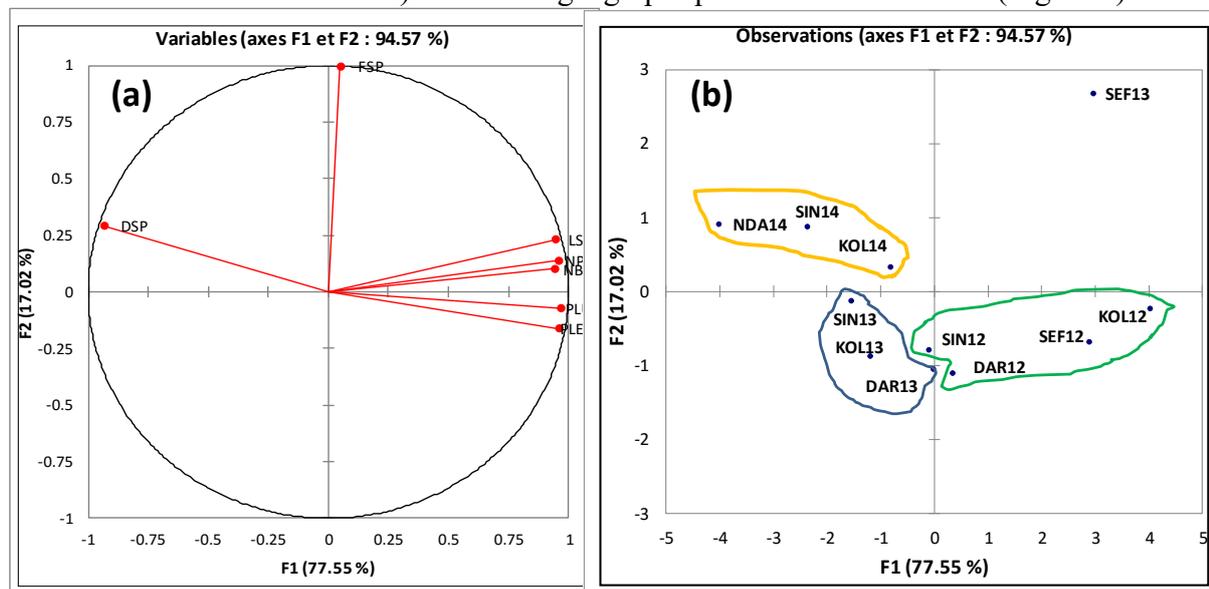


Figure 7 : Analyse en composantes principales montrant les caractéristiques pluviométriques (a) des sites d'étude au cours des années 2012, 2013 et 2014 (b). DSP : Date de début de la saison des pluies ; FSP : Date de fin de la saison des pluies ; LSP : Durée (jours) de la saison des pluies ; PLU : Pluviométrie annuelle du site (mm) ; PLES : Pluviométrie au cours de l'essai (mm) ; NBP : Nombre de jours de pluie ; NPE : Nombre de jours de pluie au cours de l'essai. DAR : Darou Pakathiar, SEF : Séfa ; KOL : Kolda ; SIN : Sinthiou Malème. Les chiffres derrière les lettres renseignent respectivement sur l'année (12 pour 2012 ; 13 pour 2013 et 14 pour 2014).

2.3.4 Performances variétales pendant l'année 2012

2.3.4.1 Durée de cycle

La présentation des résultats sur la phénologie se limitera à la durée de cycle semis-floraison car cette variable a été suivie plus rigoureusement par rapport à la durée de cycle semis-maturité. En effet, les aléas de fin de cycle (les sécheresses terminales en l'occurrence) ont rendu difficile la notation des dates de maturité telles que définies par l'échelle BBCH. Les données sur la durée de cycle semis-floraison étaient similaires sur tous les sites pour une variété de riz donnée et ont permis de distinguer deux grands groupes de variétés : le groupe des variétés précoces et celui des variétés tardives. Le premier groupe est constitué de NERICA 14, NERICA 8, NERICA 11 et NERICA 9 qui ont atteint le stade floraison à 860-907°C.j sur l'ensemble des sites. Les autres variétés ont eu une durée moyenne de cycle semis-floraison comprise entre 923°C.j et 1148°C.j (Figure 8).

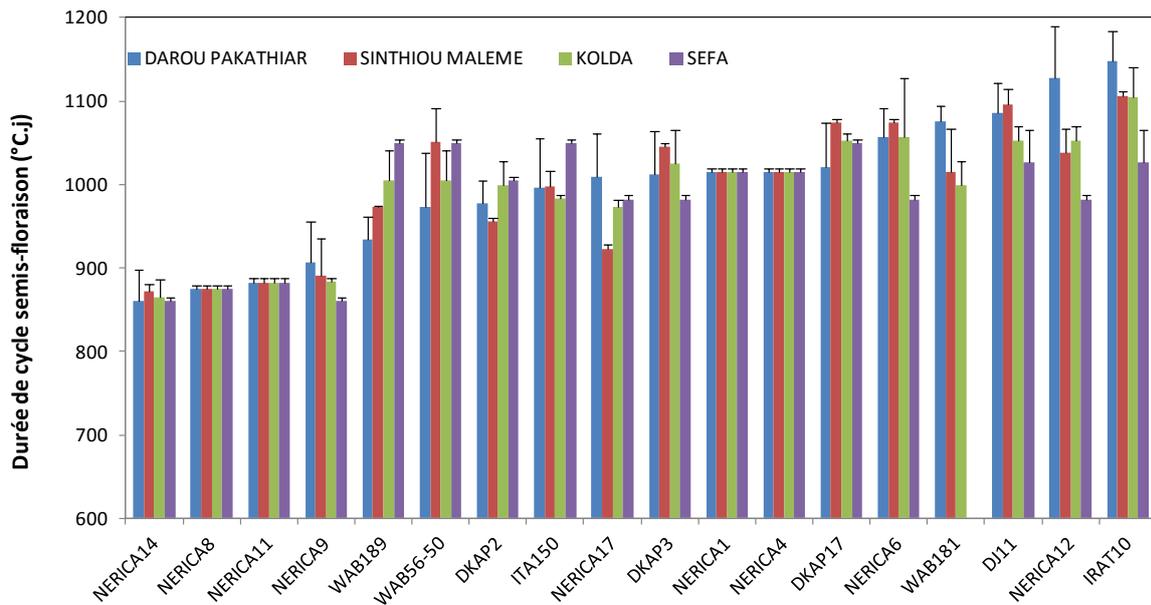


Figure 8 : Durée de cycle semis-floraison des variétés de riz étudiées en 2012 à Darou Pakathiar, Sinthiou Malème, Kolda et Séfa. Les barres d'erreur représentent les écarts-types.

2.3.3.2 Paramètres de croissance et de rendement

Des analyses de variances réalisées au seuil de 5 % ont mis en évidence un effet variétal sur l'ensemble des huit paramètres de croissance et de rendement étudiés. Ainsi, les plus hautes variétés étaient NERICA 6, WAB 189, WAB 56-50 et NERICA 8 et mesuraient en moyenne 95 cm. Avec une hauteur moyenne de 71 cm, DKA P17 était la variété la plus courte. Toutes les autres variétés avaient une taille moyenne comprise entre 77 cm et 92 cm. La variété IRAT 10 avait le tallage le plus abondant (248 talles.m⁻²) mais avait un faible indice de récolte (0,24), un taux de stérilité plus élevé (49 %) et des grains relativement plus petits (23 g pour mille grains). Avec un rendement grains de 2880 kg.ha⁻¹, la variété NERICA 14 a été la plus productive avec le meilleur indice de récolte (0,48) et les plus gros grains (30 g pour mille grains) alors qu'elle fait partie, avec NERICA 6, NERICA 12 et WAB 56-50, des variétés ayant tallé le moins. Les variétés DKA P2 et DKA P17 ont affiché de faibles performances notamment au niveau du rendement grains et de l'indice de récolte respectivement. La variété DKA P17 a aussi été caractérisée par le plus faible nombre d'épillets par panicule. La variété NERICA 8 a produit le plus grand nombre d'épillets par panicule.

Le site a eu un effet significatif sur l'ensemble des paramètres de croissance et de rendement étudiés. Ainsi, les performances variétales les plus faibles, sur tous les paramètres étudiés, ont été enregistrées à Darou Pakathiar. Sur ce site, les variétés étaient de petite taille et étaient

caractérisées par un très faible tallage, une faible biomasse végétative, le plus petit nombre d'épillets par panicule, le taux de stérilité le plus élevé et le plus faible rendement grains. Les meilleures performances variétales étaient observées à Sinthiou Malème et à Kolda sauf au niveau du taux de stérilité et du poids de mille grains où les meilleures valeurs ont été enregistrées à Séfa.

Des analyses en composantes principales (ACP) ont permis de mieux visualiser les effets des facteurs site, variété et de leurs interactions sur le rendement grains et ses composantes (Figure 9). Indépendamment du site, les axes F1 et F2 issus de l'ACP rendent compte des informations initiales à plus de 80%. L'axe F1 est corrélé au poids de mille grains et au taux de stérilité et l'axe F2 est corrélé au nombre d'épillets par panicule. Ainsi, plus le taux de stérilité est élevé, moins les grains sont remplis. Le taux de stérilité et le poids de mille grains sont les composantes du rendement grains les plus déterminantes à Darou Pakathiar, Sinthiou Malème et Séfa mais le rendement grains est beaucoup plus dépendant du nombre d'épillets par panicule à Kolda.

Dans l'ensemble, sur tous les sites, les groupes de variétés les plus performantes se présentent comme suit, par ordre décroissant : les NERICAs, les *Oryza sativa* et les autres variétés hybrides. Au nombre des NERICAs, NERICA 4 et NERICA 6 ont eu de forts taux de stérilité couplés à un faible poids de mille grains à Darou Pakathiar et à Sinthiou Malème alors que ces mêmes variétés avaient de faibles taux de stérilité et de forts poids de mille grains à Kolda et à Séfa. NERICA 1 avait de faible poids de mille grains et un fort taux de stérilité sur tous les sites sauf à Kolda. La variété NERICA 8 a particulièrement eu un très fort taux de stérilité à Kolda malgré son grand nombre d'épillets par panicule. NERICA 14, NERICA 17 et NERICA 12 ont eu les meilleurs rendements grains (couplés à de faibles taux de stérilité et des poids de mille grains élevés) sur tous les sites sauf à Kolda où NERICA 12 a eu un rendement grains moyen. Au nombre des sativa, IRAT 10 a eu le taux de stérilité le plus élevé et le poids de mille grains le plus faible sur tous les sites sauf à Séfa. Les meilleurs variétés sativa sont : WAB 189 (sur tous les sites), WAB 181-18 (à Darou Pakathiar) et DJ 11 (surtout à Sinthiou Malème). Les autres variétés hybrides (différentes des NERICAs) ont été caractérisées par de forts taux de stérilité, de faibles poids de mille grains et de faibles rendements grains sur tous les sites.

Toutes les variétés précoces (NERICA 8, NERICA 9, NERICA 11 et NERICA 14) avaient de bons rendements grains, des poids de mille grains élevés et de faibles taux de stérilité à Darou

Pakathiar et à Sinthiou Malème mais à part NERICA 14, la plupart d'entre elles ont eu de mauvais rendements grains, de forts taux de stérilité et de faibles poids de mille grains à Kolda et à Séfa.

Le tableau V renferme les informations portant sur les essais de 2012.

Tableau V : Valeurs moyennes des paramètres agronomiques en 2012 suivant la variété de riz et le site

| | HAUT | TAL | PANI | INFERT | RDTG | RDTP | IR | EPIL | STERIL | PMG |
|-----------------------|-------|---------|------|--------|-----------|---------|------------|-----------|--------|------------|
| VARIETE DE RIZ | | | | | | | | | | |
| Hybride NERICA | | | | | | | | | | |
| NERICA 1 | 86 ab | 193 abc | * | * | 1804 bcd | 2561 b | 0.29 ef | 103 abcde | 29 b | 25.1 cde |
| NERICA 4 | 92 ab | 181 bc | * | * | 1962 abcd | 2510 b | 0.37 abcde | 101 abcde | 26 b | 25.3 bcde |
| NERICA 6 | 97 a | 150 c | * | * | 2019 abcd | 3279 ab | 0.32 def | 105 abcde | 26 b | 25.3 bcde |
| NERICA 8 | 94 a | 205 abc | * | * | 2586 abc | 3026 ab | 0.41 abcd | 132 a | 29 b | 25.2 bcde |
| NERICA 9 | 83 ab | 190 abc | * | * | 2520 abc | 2404 b | 0.47 ab | 128 ab | 30 ab | 24.9 cde |
| NERICA 11 | 83 ab | 187 bc | * | * | 2232 abc | 1974 b | 0.46 abc | 124 abc | 26 b | 26.5 abcde |
| NERICA 12 | 82 ab | 174 c | * | * | 2164 abcd | 2591 b | 0.41 abcd | 115 abcd | 27 b | 29.8 ab |
| NERICA 14 | 82 ab | 169 c | * | * | 2880 a | 2298 b | 0.48 a | 112 abcde | 19 b | 30.1 a |
| NERICA 17 | 88 ab | 197 abc | * | * | 2749 ab | 2842 ab | 0.42 abcd | 93 bcde | 18 b | 29 abc |
| Oryza sativa | | | | | | | | | | |
| DJ11-509 | 79 ab | 233 ab | * | * | 2675 abc | 3145 ab | 0.38 abcde | 99 abcde | 29 ab | 24.1 de |
| IRAT 10 | 77 ab | 248 a | * | * | 1693 cd | 4094 a | 0.24 f | 90 cde | 49 a | 22.9 e |
| ITA 150 | 86 ab | 185 bc | * | * | 1955 abcd | 2746 ab | 0.33 def | 86 de | 27 b | 28.8 abc |
| WAB 181-18 | 89 ab | 185 bc | * | * | 2168 abcd | 2574 b | 0.4 abcde | 127 abc | 33 ab | 25.9 abcde |
| WAB 189 | 96 a | 181 bc | * | * | 2571 abc | 3108 ab | 0.44 abcd | 122 abcd | 22 b | 28.3 abcd |
| WAB 56-50 | 95 a | 174 c | * | * | 2167 abcd | 2961 ab | 0.34 cdef | 88 cde | 28 b | 26.5 abcde |
| Autre hybride | | | | | | | | | | |
| DKA P2 | 79 ab | 197 abc | * | * | 1939 abcd | 3026 ab | 0.34 cdef | 100 abcde | 32 ab | 25.7 abcde |
| DKA P3 | 83 ab | 187 bc | * | * | 1710 bcd | 2493 b | 0.35 bcdef | 95 bcde | 25 b | 26.5 abcde |
| DKA P17 | 71 b | 189 bc | * | * | 1104 d | 3111 ab | 0.24 f | 76 e | 36 ab | 24.5 cde |
| SITE | | | | | | | | | | |
| DAROU PAKATHIAR | 69 b | 170 c | * | * | 1155 c | 1879 c | 0.34 b | 87 b | 35 a | 25.8 b |
| SINTHIOU MALEME | * | 209 a | * | * | 2845 a | 3605 a | 0.39 a | 112 a | 26 bc | 26.4 ab |
| KOLDA | 102 a | 192 b | * | * | 2508 a | * | * | 109 a | 30 ab | 25.4 b |
| SEFA | * | * | * | * | 2135 b | 2996 b | 0.39 a | 112 a | 21 c | 27.9 a |

Au niveau de chaque facteur, les moyennes en colonne affectées de la même lettre ne sont pas statistiquement différentes au seuil de 5%.

* donnée non disponible

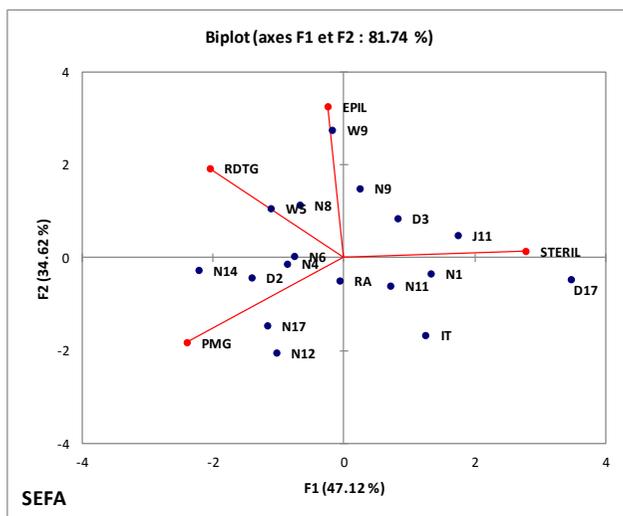
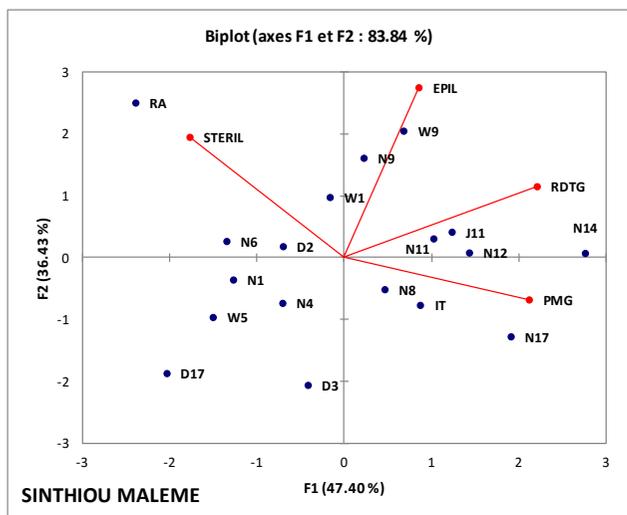
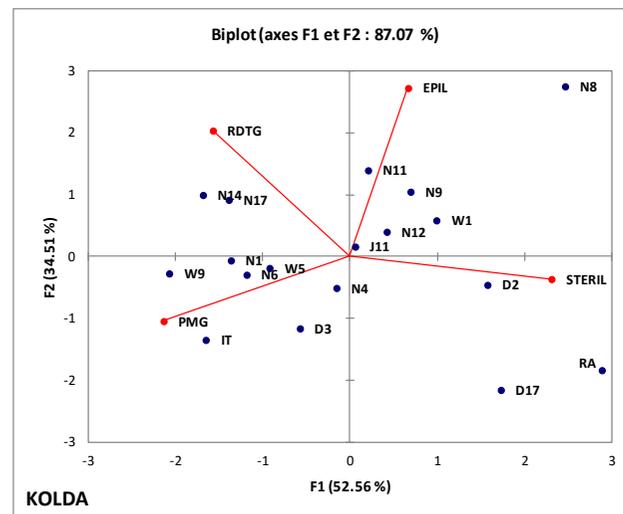
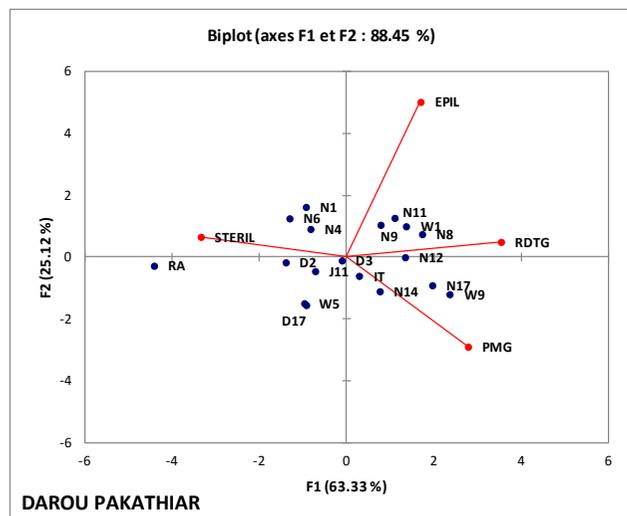


Figure 9 : Analyses en composantes principales réalisées sur le rendement grains et ses composantes obtenus en 2012 à Darou Pakathiar , Sinthiou Malème , Kolda et Séfa. Les codes des variétés et des paramètres agronomiques sont respectivement définis aux tableaux II et IV.

2.3.5 Performances variétales pendant l'année 2013

2.3.5.1 Durée de cycle

La durée de cycle semis-floraison permet de sérier les variétés de riz étudiées en deux groupes. Les variétés NERICA 14, NERICA 8, NERICA 11 et NERICA 9 ont atteint la floraison à 858-896°C.j contrairement aux autres variétés dont le cycle semis-floraison était plus long et était en moyenne compris entre 940°C.j et 1036°C.j. Chaque variété de riz a eu une durée de cycle semis-floraison relativement constante sur tous les quatre sites (Figure 10).

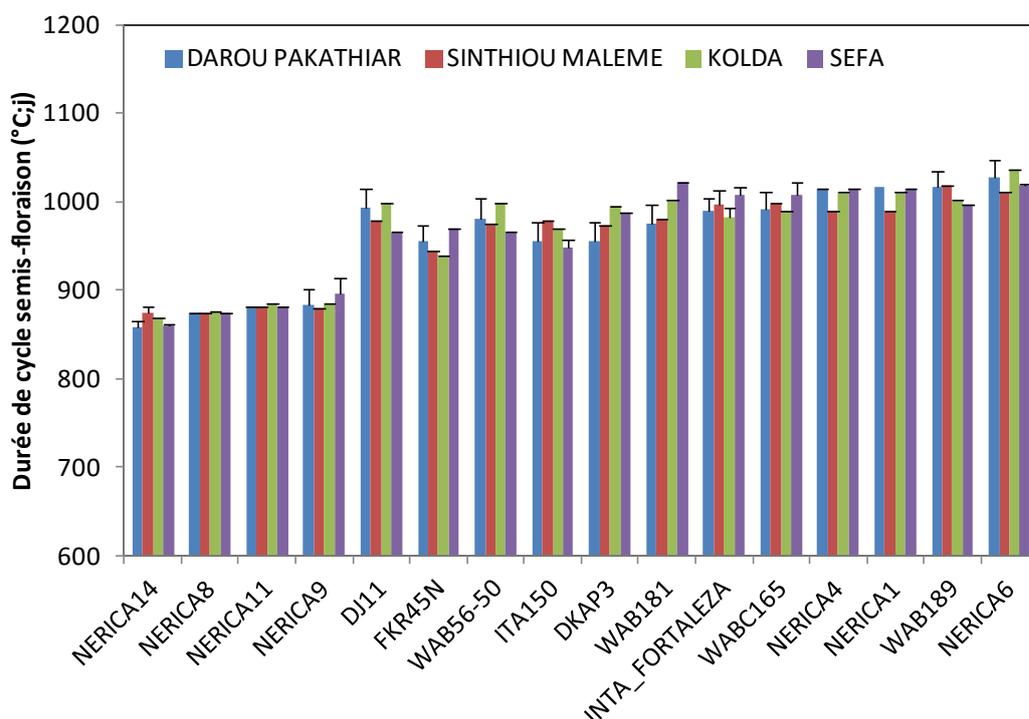


Figure 10 : Durée de cycle semis-floraison des variétés de riz étudiées en 2013 à Darou Pakathiar, Sinthiou Malème, Kolda et Séfa. Les barres d'erreur représentent les écarts-types.

2.3.5.2 Paramètres de croissance et de rendement

En 2013, il n'a pas été noté d'effet variétal sur la hauteur des plants, le rendement paille et le poids de mille grains. 7 des 10 paramètres suivis, ont permis de discriminer les variétés de riz entre elles : le nombre de talles par mètre carré, le nombre de panicules par mètre carré, le taux de talles infertiles, le rendement grains, l'indice de récolte, le nombre d'épillets par panicule et le taux de stérilité des épillets. En général, les variétés témoins, comme la plupart des variétés étudiées, ont montré des performances moyennes sur l'ensemble des paramètres étudiés. Cependant, la WAB 181-18 a produit le plus grand nombre de talles (191 talles.m⁻²),

de panicules ($131 \text{ panicules.m}^{-2}$) mais a aussi montré un pourcentage relativement plus élevé de talles infertiles (27 %). NERICA 6 a produit le plus faible nombre de talles ($114 \text{ talles.m}^{-2}$) et le plus faible nombre de panicules ($89 \text{ panicules.m}^{-2}$) avec un taux moyen de talles infertiles. NERICA 14 a été caractérisé par une production moyenne de talles et de panicules mais s'est distingué par les plus faibles taux de talles infertiles (10%) et de stérilité (29%). Cette même variété a eu le meilleur indice de récolte ($IR=0,55$) et la plus faible valeur de ce paramètre a été enregistrée chez la NERICA 6 ($IR=0,3$). NERICA 8 a produit le plus grand nombre d'épillets par panicule alors que la plus faible valeur de ce paramètre a été enregistrée chez DKA P3.

A l'exception du poids de mille grains, l'effet site a été noté sur tous les autres paramètres étudiés. Les meilleures performances au niveau de tous les paramètres étudiés ont été obtenues à Séfa : variétés de riz plus grandes, meilleur tallage, taux de talles fertiles plus élevé, meilleur rendement grains, plus grand indice de récolte, nombre d'épillets par panicules plus élevé et plus faible taux de stérilité. Après Séfa, les deuxièmes meilleures performances ont été enregistrées à Sinthiou Malème et à Kolda. Par contre, les plus faibles valeurs ont été observées sur le site de Darou Pakathiar : plus faible rendement grains, plus faible indice de récolte et taux de stérilité plus élevé.

Des analyses en composantes principales sur le rendement grains et ses composantes ont mis en évidence que les données sont beaucoup plus structurées par site que par caractéristiques variétales (groupe de variétés, longueur de cycle) (Figure 11). Le rendement grains est plus corrélé au taux de stérilité à Séfa, au nombre de panicules à Kolda, au nombre de panicules et au poids de mille grains à Darou Pakathiar.

Le tableau VI synthétise les informations portant sur les essais de 2013.

Tableau VI : Valeurs moyennes des paramètres agronomiques en 2013 suivant la variété de riz et le site

| | HAUT | TAL | PANI | INFERT | RD TG | RD TP | IR | EPIL | STERIL | PMG |
|-----------------------|-------|--------|---------|--------|---------|--------|----------|---------|--------|--------|
| VARIETE DE RIZ | | | | | | | | | | |
| Hybride NERICA | | | | | | | | | | |
| NERICA 1 | 79 a | 141 bc | 109 abc | 24 ab | 2179 ab | 2750 a | 0.39 bcd | 132 abc | 37 ab | 26.3 a |
| NERICA 4 | 75 a | 137 bc | 114 abc | 18 ab | 1897 ab | 2721 a | 0.4 bcd | 124 bc | 40 ab | 25.4 a |
| NERICA 6 | 88 a | 114 c | 89 c | 22 ab | 1776 b | 2180 a | 0.3 d | 156 abc | 49 ab | 23.7 a |
| NERICA 8 | 79 a | 127 bc | 114 abc | 10 b | 2274 ab | 2438 a | 0.43 bc | 205 a | 57 a | 26 a |
| NERICA 9 | 80 a | 141 bc | 115 abc | 18 ab | 2298 ab | 2647 a | 0.42 bcd | 162 abc | 41 ab | 25.2 a |
| NERICA 11 | 83 a | 148 b | 129 ab | 14 ab | 3023 a | 2574 a | 0.47 ab | 156 abc | 40 ab | 25.4 a |
| NERICA 14 | 87 a | 121 bc | 108 abc | 10 b | 2608 ab | 2080 a | 0.55 a | 151 abc | 29 b | 24.9 a |
| Oryza sativa | | | | | | | | | | |
| DJ11-509 | 80 a | 142 bc | 119 abc | 16 ab | 2183 ab | 2090 a | 0.46 ab | 158 abc | 46 ab | 24.3 a |
| ITA150 | 89 a | 144 b | 120 abc | 16 ab | 2440 ab | 2539 a | 0.4 bcd | 112 bc | 35 ab | 25 a |
| INTA FORTALEZA | 72 a | 141 bc | 121 abc | 14 ab | 2167 ab | 2050 a | 0.45 abc | 148 abc | 45 ab | 24.7 a |
| WAB 181-18 | 71 a | 191 a | 131 a | 27 a | 1870 b | 2474 a | 0.38 bcd | 146 abc | 53 ab | 23.6 a |
| WAB 189 | 86 a | 127 bc | 100 abc | 21 ab | 1720 b | 2129 a | 0.35 bcd | 176 ab | 50 ab | 25.3 a |
| WAB 56-50 | 78 a | 142 bc | 118 abc | 16 ab | 1848 b | 2206 a | 0.4 bcd | 122 bc | 41 ab | 25.7 a |
| WAB C165 | 77 a | 121 bc | 95 bc | 23 ab | 1899 ab | 1851 a | 0.4 bcd | 124 bc | 35 ab | 23.3 a |
| Autre hybride | | | | | | | | | | |
| DKA P3 | 79 a | 144 bc | 115 abc | 20 ab | 1540 b | 2197 a | 0.34 cd | 92 c | 38 ab | 25.8 a |
| FKR 45N | 77 a | 136 bc | 113 abc | 18 ab | 2143 ab | 1962 a | 0.45 abc | 117 bc | 35 ab | 25.5 a |
| SITE | | | | | | | | | | |
| DAROU | 62 c | 113 d | 94 b | 17 b | 745 c | 1248 c | 0.32 c | 122 b | 63 a | 24.6 a |
| SINTHIOU MALEME | 83 b | 149 b | 127 a | 15 b | 2137 b | 3004 a | 0.38 b | 128 b | 33 c | 25.1 a |
| KOLDA | 60 c | 127 c | 107 b | 16 b | 1961 b | 2714 a | 0.37 b | 163 a | 47 b | 25.3 a |
| SEFA | 103 a | 163 a | 124 a | 23 a | 3501 a | 2136 b | 0.58 a | 156 a | 26 c | 24.9 a |

Au niveau de chaque facteur, les moyennes en colonne affectées de la même lettre ne sont pas statistiquement différentes au seuil de 5%.

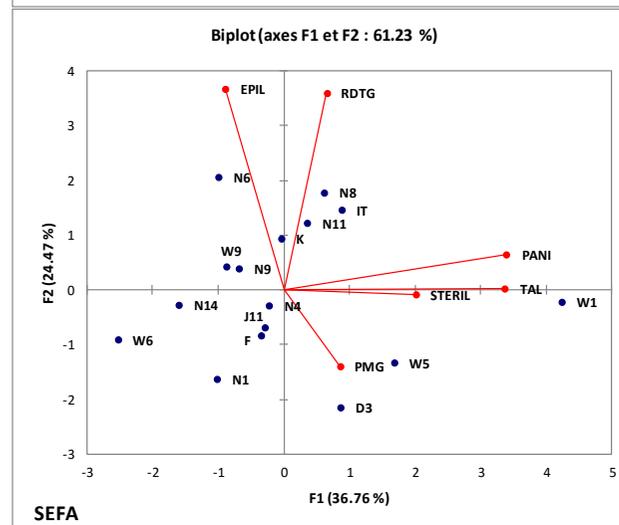
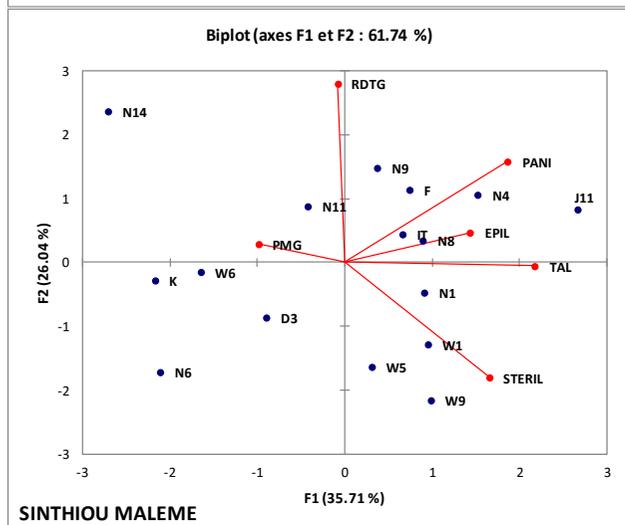
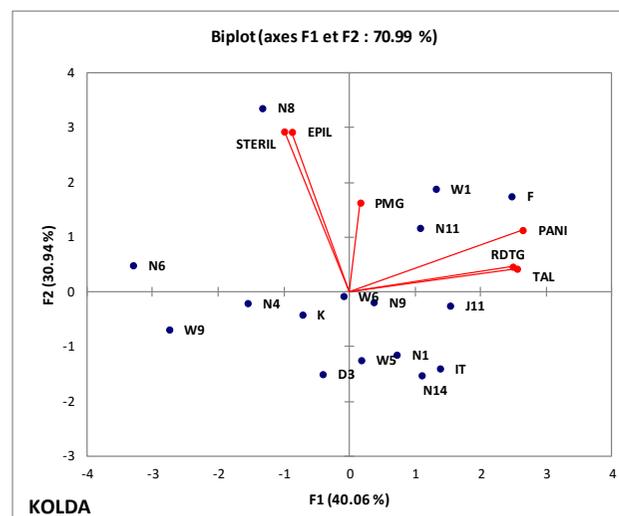
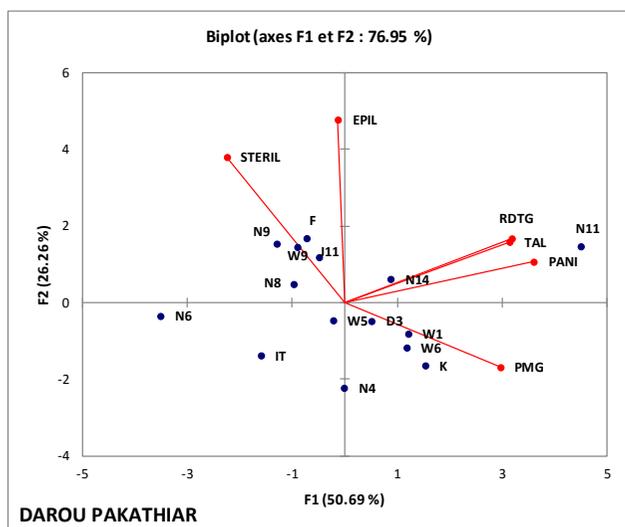


Figure 11 : Analyses en composantes principales réalisées sur le rendement grains et ses composantes obtenus en 2013 à Darou Pakathiar, Sinthiou Malème, Kolda et Séfa. Les codes des variétés et des paramètres agronomiques sont respectivement définis aux tableaux II et IV.

2.3.6 Performances variétales pendant l'année 2014

2.3.6.1 Durée de cycle

Les variétés NERICA 14, NERICA 8 et NERICA 11 ont eu une durée de cycle semis-floraison moyenne de 840-889°C.j et les autres variétés, plus tardives ont atteint le stade floraison à 967-1027°C.j indépendamment du site expérimental (Figure 12).

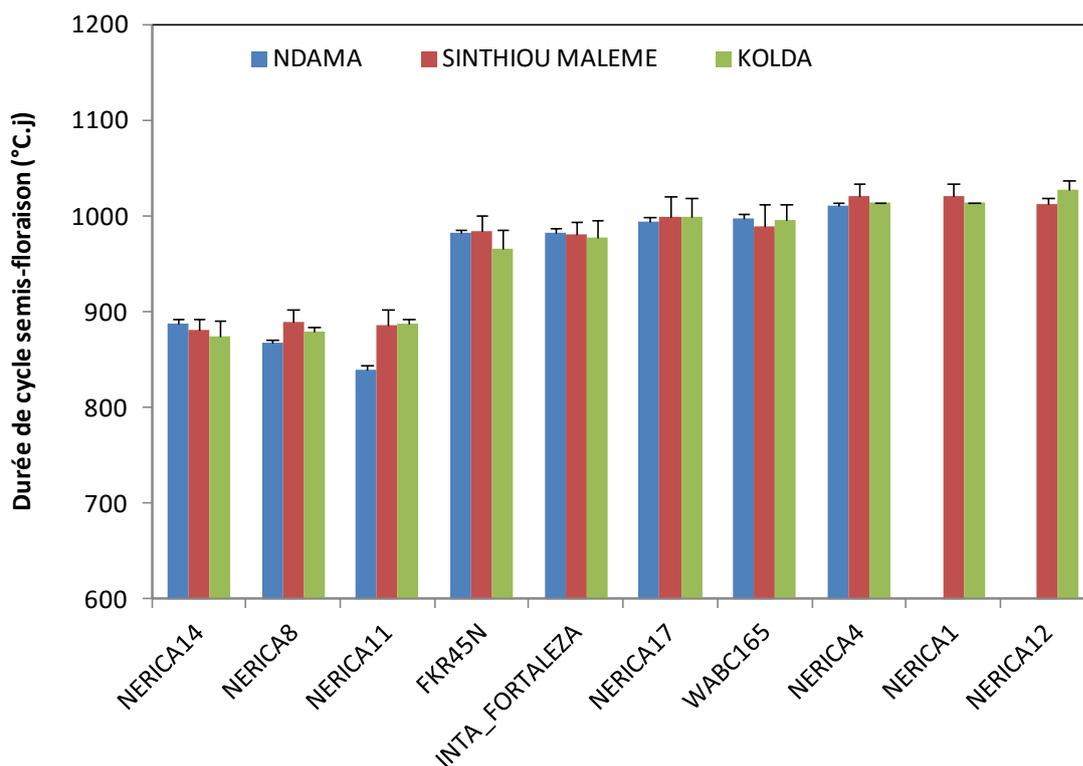


Figure 12 : Durée de cycle semis-floraison des variétés de riz étudiées en 2014 à Darou Pakathiar, Sinthiou Malème, Kolda et Séfa. Les barres d'erreur représentent les écarts-types.

2.3.6.2 Paramètres de croissance et de rendement

Au cours de l'année 2014, pour des contraintes liées au sol, les essais à Darou Pakathiar et à Séfa ont été abandonnés dès les premiers jours de végétation. Ainsi, seuls les essais installés à Sinthiou Malème, Kolda et N'Dama (un site villageois dans le Bassin arachidier) ont été conduits jusqu'à terme. Cependant, à N'Dama, les données se rapportant aux mesures de hauteur, au nombre de talles et de panicules n'ont pas pu être collectées.

Selon les données recueillies, hormis le nombre de panicules par mètre carré, le taux de talles infertiles et le nombre d'épillets par panicule, il a été noté un effet variété sur tous les 7 autres

paramètres étudiés. NERICA 14 a particulièrement affiché les valeurs les plus élevées de rendement grains, d'indice de récolte, du nombre d'épillets par panicules, du taux de fertilité des épillets et du poids de mille grains. Les variétés NERICA 14, INTA FORTALEZA et NERICA 8 ont eu les meilleurs rendements grains alors que le plus faible rendement grains a été obtenu chez NERICA 12. Cette même variété, de petite taille, avait produit une abondante paille par suite d'un tallage abondant. Elle avait le plus faible indice de récolte et un fort taux de stérilité.

Sur les données qui ont pu être collectées par site, aucun effet site n'a été observé sur la hauteur des plants, le nombre de panicules par mètre carré et le taux de stérilité. Parmi les trois sites étudiés, les performances les plus faibles ont été enregistrées à N'Dama : plus faible rendement grains, plus faible nombre d'épillets par panicule et plus faible poids de mille grains. Les variétés de riz avaient un tallage plus abondant à Kolda, un taux de talles fertiles plus élevé et un indice de récolte plus élevé. Par contre les variétés ont eu un meilleur rendement grains et un plus grand nombre d'épillets par panicule à Sinthiou Malème qu'à Kolda.

Le tableau VII et la figure 13 synthétisent les informations portant sur les essais de 2014.

Tableau VII : Valeurs moyennes des paramètres agronomiques en 2014 suivant la variété de riz et le site

| | HAUT | TAL | PANI | INFERT | RDTG | RDTP | IR | EPIL | STERIL | PMG |
|----------------------------|--------|--------|-------|--------|---------|----------|----------|-------|--------|-------|
| VARIETES DE RIZ | | | | | | | | | | |
| Hybride NERICA | | | | | | | | | | |
| NERICA1 | 109 bc | 157 ab | 141 a | 11 a | 1523 ab | 5433 abc | 0.2 de | 121 a | 58 a | 21 bc |
| NERICA4 | 99 c | 151 ab | 112 a | 12 a | 1689 ab | 5240 abc | 0.23 cde | 91 a | 45 abc | 21 bc |
| NERICA8 | 101 bc | 145 ab | 130 a | 9 a | 2238 a | 3449 bc | 0.34 ab | 124 a | 37 bc | 20 c |
| NERICA11 | 103 bc | 144 ab | 136 a | 8 a | 1983 ab | 3756 bc | 0.32 bc | 127 a | 36 c | 20 c |
| NERICA12 | 98 c | 146 ab | 128 a | 12 a | 1132 b | 6723 a | 0.13 e | 122 a | 57 ab | 25 ab |
| NERICA14 | 99 c | 129 ab | 114 a | 11 a | 2461 a | 3121 c | 0.43 a | 123 a | 36 c | 25 a |
| NERICA17 | 114 ab | 127 b | 113 a | 9 a | 1752 ab | 5129 abc | 0.26 bcd | 125 a | 42 abc | 21 bc |
| <i>Oryza sativa</i> | | | | | | | | | | |
| INTA_FORTALEZA | 108 bc | 162 a | 130 a | 12 a | 2313 a | 5084 abc | 0.28 bcd | 98 a | 35 c | 24 ab |
| WABC165 | 127 a | 138 ab | 140 a | 21 a | 2105 ab | 5593 ab | 0.23 cde | 100 a | 36 c | 26 a |
| Autre hybride | | | | | | | | | | |
| FKR45N | 104 bc | 146 ab | 150 a | 12 a | 1639 ab | 3150 c | 0.3 bcd | 94 a | 39 abc | 24 ab |
| SITE | | | | | | | | | | |
| KOLDA | 108 a | 155 a | 144 a | 7 b | 1872 b | 3661 b | 0.3 a | 117 a | 43 a | 23 a |
| NDAMA | * | * | 135 a | * | 1071 c | 2585 c | 0.28 ab | 90 b | 45 a | 20 b |
| SINTHIOU MALEME | 105 a | 137 b | 116 a | 15 a | 2356 a | 6244 a | 0.26 b | 120 a | 39 a | 24 a |

Au niveau de chaque facteur, les moyennes en colonne affectées de la même lettre ne sont pas statistiquement différentes au seuil de 5%.

* donnée non disponible

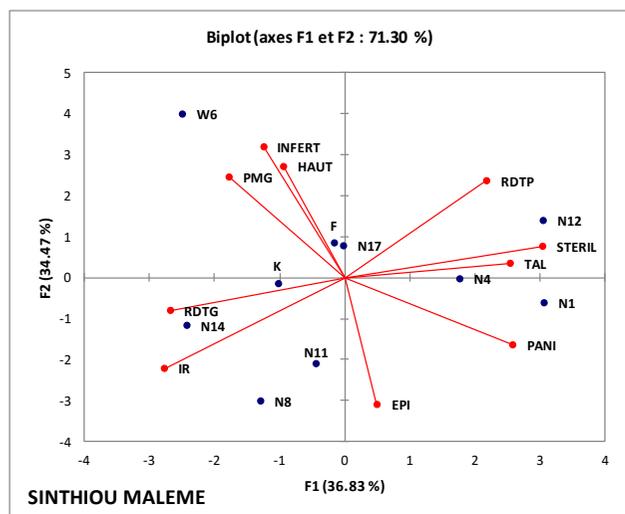
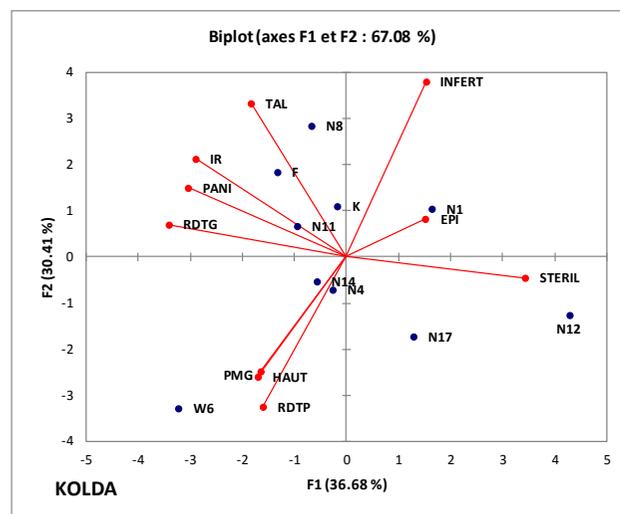
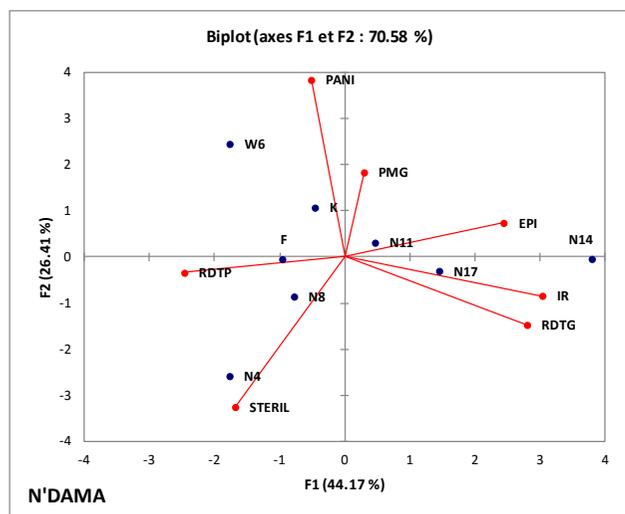


Figure 13 : Analyses en composantes principales réalisées sur le rendement grains et ses composantes obtenus en 2014 à N'Dama, Sinthiou Malème et Kolda. *Les codes des variétés et des paramètres agronomiques sont respectivement définis aux tableaux II et IV.*

2.3.7 Performances variétales avec prise en compte de l'effet année

La prise en compte de l'effet de l'année sur les performances agronomiques étudiées a été effectuée sur les cinq variétés de riz communes aux essais de 2012, 2013 et 2014. Ces variétés sont : NERICA 1, NERICA 4, NERICA 8, NERICA 11 et NERICA 14. Par ailleurs, des contraintes biotiques (attaques de termites ou de nématodes) et pédologiques n'ont pas permis de conduire les essais durant trois années de suite sur les sites de Darou Pakathiar, Séfa et N'Dama : ces sites n'ont donc pas été pris en compte dans les présentes analyses. Par contre, les analyses ont été effectuées sur les sites de Kolda et Sinthiou Malème où les essais ont été conduits jusqu'à terme sur les trois années.

2.3.7.1 Durée de cycle

La durée de cycle semis-floraison des cinq variétés n'a pas été influencée par l'année d'essai. L'on distingue plutôt deux groupes de variétés quel que soient le site et l'année d'étude : les variétés précoces (NERICA 14, NERICA 8 et NERICA 11) ayant réalisé la floraison à 864-889°C.j et les variétés plus tardives (NERICA 1 et NERICA 4) pour lesquelles la durée de cycle semis-floraison était de 990-1021°C.j (Figure 14).

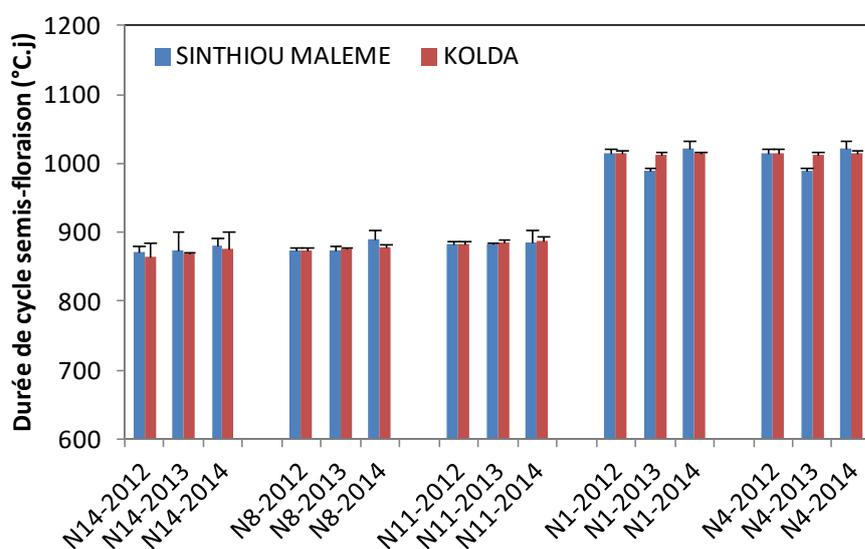


Figure 14 : Durée de cycle semis-floraison de NERICA 14 (N14), NERICA 8 (N8), NERICA 11 (N11), NERICA 1 (N1), NERICA 4 (N4) au cours des années 2012, 2013 et 2014 à Sinthiou Malème et à Kolda. Les barres d'erreur représentent les écarts-types.

2.3.7.2 Paramètres de croissance et de rendement

Hormis le taux de talles infertiles, l'année d'expérimentation a eu un effet significatif sur toutes les autres performances des variétés. De plus, à l'exception du taux de stérilité, il n'y

avait pas d'interaction entre les facteurs année et variété sur les performances agronomiques enregistrées. Ainsi, en moyenne, les cinq variétés avaient de meilleures performances en 2012 par rapport aux autres années : elles étaient plus hautes avec un abondant tallage et des valeurs plus élevées au niveau du poids de mille grains, de l'indice de récolte, du rendement grains et du taux de fertilité des épillets. En 2013, les cinq variétés étaient moins hautes, avaient moins de talles et de panicules par rapport aux deux autres années. Les valeurs de rendement grains, de rendement paille et de taux de stérilité étaient cependant moyennes. Pendant cette même année, les panicules portaient le plus grand nombre d'épillets et les grains étaient bien remplis. L'année 2014 a été caractérisée par une abondante biomasse végétative, un faible rendement grains, un faible nombre d'épillets par panicule dont une grande partie était vide et le reste était faiblement rempli.

Sur les trois années d'expérimentation, le nombre de talles a été le paramètre végétatif ayant discriminé les variétés entre elles. Un effet variétal a aussi été noté sur le rendement grains, l'indice de récolte, le nombre d'épillets par panicule, le taux de stérilité et le poids de mille grains. Les variétés à cycle plus long (NERICA 1 et NERICA 4) ont globalement enregistré les meilleures performances végétatives que les variétés à cycle plus court (NERICA 8, NERICA 11 et NERICA 14). Ces dernières avaient plutôt de meilleures performances au niveau des paramètres mis en place pendant les phases de reproduction et de maturité. Elles avaient en effet un plus grand nombre d'épillets par panicule, de plus faibles taux de stérilité, de meilleurs indices de récolte et de meilleurs rendements grains comparativement aux variétés à cycle de 90-100 jours.

Les performances ayant différé d'un site à l'autre sont : le rendement grains, l'indice de récolte et le nombre d'épillets par panicule. Les panicules des variétés de riz portaient beaucoup plus d'épillets à Sinthiou Malème qu'à Kolda. Aussi, les indices de récolte et les rendements grains obtenus à Sinthiou Malème étaient meilleurs que ceux enregistrés à Kolda. Par contre, les performances végétatives (hauteur des plants, nombre de talles, rendement paille), les taux de stérilité et les poids de mille grains n'étaient pas statistiquement différents sur les deux sites. Les tableaux VIII et IX contiennent une synthèse des données portant sur l'effet de l'année sur les performances des variétés de riz pluvial.

Tableau VIII : Seuils de significativité des tests d'analyse de variance suivant les facteurs année, variété, site et leurs interactions

| | HAUT | TAL | PANI | INFERT | RDTG | RDTP | IR | EPIL | STERIL | PMG |
|--------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Répétition | 0,628 | 0,212 | 0,250 | 0,871 | 0,897 | 0,078 | 0,145 | 0,305 | 0,291 | 0,002 |
| Année | 0,024 | 0,000 | 0,000 | 0,190 | 0,000 | 0,011 | 0,000 | 0,046 | 0,000 | 0,000 |
| Site | 0,594 | 0,547 | 0,092 | 0,318 | 0,049 | 0,219 | 0,007 | 0,001 | 0,795 | 0,588 |
| Variété | 0,356 | 0,043 | 0,497 | 0,009 | 0,000 | 0,341 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,003 |
| Annéexsite | 0,822 | 0,000 | 0,000 | 0,018 | 0,219 | 0,269 | 0,227 | 0,262 | 0,003 | 0,172 |
| Annéexvariété | 0,821 | 0,269 | 0,470 | 0,150 | 0,787 | 0,813 | 0,520 | 0,551 | 0,015 | 0,451 |
| SitexVariété | 0,944 | 0,973 | 0,797 | 0,977 | 0,095 | 0,752 | 0,150 | 0,063 | 0,052 | 0,092 |
| AnnéexSitexVariété | 0,740 | 0,002 | 0,838 | 0,520 | 0,331 | 0,952 | 0,681 | 0,714 | 0,258 | 0,652 |

Le test est significatif au seuil de 5% ($p < 0,05$; valeur en gras)

Tableau IX : Valeurs moyennes des paramètres agronomiques suivant l'année, la variété de riz et le site

| | HAUT | TAL | PANI | INFERT | RDTG | RDTP | IR | EPIL | STERIL | PMG |
|-----------------------|-------|--------|-------|--------|---------|---------|--------|--------|--------|--------|
| Année | | | | | | | | | | |
| 2012 | 103 a | 200 a | * | * | 2920 a | 3062 ab | 0,43 a | 121 ab | 25,2 c | 26 a |
| 2013 | 77 b | 137 c | 114 b | 16 a | 1803 b | 2544 b | 0,36 b | 141 a | 44,5 b | 25 a |
| 2014 | 97 a | 149 b | 128 a | 13 a | 1501 b | 3680 a | 0,27 c | 111 b | 56,7 a | 21 b |
| Variété de riz | | | | | | | | | | |
| NERICA 1 | 94 a | 160 a | 122 a | 20 a | 1368 c | 3460 a | 0,23 b | 109 b | 56,5 a | 23,7 b |
| NERICA 4 | 88 a | 152 ab | 119 a | 17 ab | 1520 bc | 3432 a | 0,26 b | 99 b | 49,9 a | 23,1 b |
| NERICA 8 | 90 a | 150 ab | 125 a | 12 ab | 1997 b | 2820 a | 0,37 a | 154 a | 46,5 a | 23,1 b |
| NERICA 11 | 87 a | 145 ab | 122 a | 11 b | 1939 b | 2907 a | 0,37 a | 130 ab | 44,8 a | 22,8 b |
| NERICA 14 | 96 a | 138 b | 113 a | 9 b | 3108 a | 3140 a | 0,46 a | 131 ab | 24,4 b | 27,1 a |
| Site | | | | | | | | | | |
| KOLDA | 90 a | 151 a | 119 a | 16 a | 1728 b | 3270 a | 0,31 b | 114 b | 48 a | 23,5 a |
| SINTHIOU MALEME | 90 a | 149 a | 126 a | 14 a | 2058 a | 2924 a | 0,35 a | 140 a | 45 a | 23,7 a |

Au niveau de chaque facteur, les moyennes en colonne affectées de la même lettre ne sont pas statistiquement différentes au seuil de 5%.

* donnée non disponible

2.4 Discussion

Les essais ont été conduits sur les trois années pendant la saison des pluies et ils ont porté sur diverses variétés de riz dont le nombre a varié d'une année à l'autre car il ne fallait pas retenir celles qui avaient de faibles performances agronomiques. Néanmoins, au cours d'une même année, les variétés de riz étudiées étaient les mêmes sur tous les sites. Ce sont ces raisons qui nous ont emmené à présenter les résultats par année et que l'effet « année » n'a été étudié que sur les variétés présentes toutes les années sur les sites ayant enregistré le plus grand nombre d'essais. Cette même méthodologie a déjà été utilisée par Magne (1975) lorsqu'il étudiait sur 7 années (de 1967 à 1973) les rendements en culture pluviale de diverses variétés de riz au Sénégal, précisément à Djibélor, Séfa, Sinthiou Malème et Nioro du Rip. La liste du matériel végétal mis en expérimentation était modifiée pour tenir compte des acquis des années antérieures et ainsi les variétés aux rendements insuffisants étaient retirées et remplacées par d'autres, au meilleur potentiel, proposées par la recherche agronomique. Dans ces conditions, les résultats n'ayant pas été observés sur plus d'une année ou sur plus d'un site inviteraient à une grande prudence quant aux interprétations qu'on pourrait leur apporter. La présente discussion est alors orientée sur les tendances générales observées sur au moins deux années ou sur au moins deux sites différents.

Les sites étudiés, situés entre $12,82^{\circ}$ et $13,96^{\circ}$ de latitude nord, étaient certes localisés dans différentes zones agroécologiques mais pouvaient être regroupées en différentes catégories sur la base des paramètres climatiques et des types de sol. En effet, les températures journalières enregistrées à Darou Pakathiar ($13,96^{\circ}$ N) et Sinthiou Malème ($13,83^{\circ}$ N) ont été légèrement plus élevées avec de plus grandes amplitudes que celles enregistrées sur les sites de Kolda ($12,86^{\circ}$ N) et Séfa ($12,83^{\circ}$ N). Cependant pour un même site, les valeurs moyennes de températures sont demeurées similaires quelle que soit l'année d'étude. Ce qui n'était pas le cas pour la hauteur et la répartition de la pluie. En effet, ces deux caractéristiques de la pluviométrie ont permis de mettre en évidence que l'année 2012 a été plus humide que l'année 2013 et que l'année 2014 a été l'année la plus sèche des trois années d'étude. Au cours des années 2012 et 2014, les sites du sud (Kolda et Séfa) ont été plus humides que ceux situés au nord (Darou Pakathiar et Sinthiou Malème) de la zone d'étude. Par contre en 2013, le site de Darou Pakathiar

a été plus pluvieux que celui de Kolda. Au cours de cette même année, le site de Séfa s'est démarqué des autres sites par une abondante pluviosité et une longue saison des pluies. La localisation géographique d'un site ne permet donc pas toujours de présager du caractère humide ou sec de son climat ; ce qui confirme le caractère aléatoire de la saison pluvieuse au sein de la zone étudiée (Baron *et al.*, 2005; Sultan *et al.*, 2008 ; Salack *et al.*, 2011).

Par ailleurs, vu que les températures enregistrées ont été similaires sur chaque site quelle que soit l'année et que les variétés étudiées sont insensibles à la photopériode (De Vries et Meertens, 2014 ; FAO, 2008), la variabilité dans la longueur du cycle d'une variété de riz donnée devrait être appréhendée sous l'angle d'une insatisfaction de ses besoins hydriques (Bois *et al.*, 1984a, b). Or il a été noté que les durées de cycle semis-floraison de chaque variété sont restées peu variables sur l'ensemble de tous les essais malgré que certains essais se soient montrés plus secs que d'autres. Cela pourrait être dû au fait que la plupart des poches de sécheresse au cours du cycle cultural aient été enregistrées après la floraison des variétés. C'est pour cette raison qu'il a été enregistré une abondante production de biomasse végétative par les variétés de riz sur les trois années d'essais, surtout en 2014. Une étude portant sur la durée de cycle semis-maturité aurait permis de savoir si le cycle cultural des variétés étudiées avait fluctué sous l'effet d'une carence en alimentation en eau. Des études ultérieures sur la phénologie dans les mêmes zones géographiques devraient alors porter plus d'intérêt sur ce paramètre. Nos données ont montré que sur chaque essai, les variétés de riz étudiées pouvaient être classées en deux groupes suivant la longueur du cycle : les variétés précoces, constituées de NERICA 8, NERICA 9, NERICA 11 et NERICA 14, et les variétés tardives. Les informations contenues dans les catalogues officiels des variétés étudiées distinguaient déjà les quatre variétés précoces des autres variétés (AfricaRice, 2008 ; IER, 2009 ; CNS, 2014 ; ISRA, 2012 ; INTA, 2011). Cela permet alors de considérer que les différentes variétés ont eu la même réaction (au niveau phénologique) vis-à-vis des caractéristiques du milieu naturel des essais. La phénologie, plus précisément la durée de cycle semis-floraison, n'a donc pas été un caractère discriminant les variétés de riz étudiées dans leur réponse face aux contraintes environnementales.

En culture sous pluie, le rendement des plantes est fortement tributaire de la satisfaction de leurs besoins en eau, celle-ci dépendant de la fourniture en eau de pluie mais aussi du pouvoir de

rétenion hydrique du sol. Les quantités de pluie enregistrées à Darou Pakathiar sont restées parmi les plus élevées mais les sols de ce site ont été les plus filtrants. Par ailleurs, les sols de Darou Pakathiar, à pH basique, étaient plus pauvres que ceux des autres sites. Les sols de Darou Pakathiar reflètent ceux du Bassin arachidier qui se sont déstructurés et appauvris dans le temps, suite à des périodes continues de mise en culture pour la production de l'arachide (PARPEBA, 2006). Les variétés de riz étudiées ont logiquement enregistré les plus faibles performances agronomiques sur les sites du Bassin arachidier (Darou Pakathiar et N'Dama) quelles que soient les années d'essais. En effet, le riz préfère des sols légèrement acides, moins filtrants et riches en nutriments (Angladette, 1966 ; Djiba et Coly, 2007), ce qui n'était pas le cas des sols de Darou Pakathiar contrairement à ceux des autres sites. Pendant l'année la plus arrosée, les meilleurs rendements grains ont été enregistrés à Sinthiou Malème alors que les sites de Kolda et de Séfa, situés au sud de notre zone d'étude, étaient les plus pluvieux et que les plants de riz avaient reçu des quantités d'eau plus élevées sur ces sites. Par ailleurs, la répartition de la pluie et les caractéristiques édaphiques étaient globalement similaires sur les trois sites. Cela permettrait alors de suggérer que les besoins hydriques des plants aient été mieux satisfaits à Sinthiou Malème qu'à Kolda et Séfa ; il y aurait alors eu plus de quantité d'eau ruisselée sur les sites du sud, à forte pluviométrie. Par ailleurs, la plupart des variétés précoces ont été caractérisées par de forts taux de stérilité, de faibles poids de mille grains et de faibles rendements grains sur les sites du sud comparativement à ceux du nord, relativement plus secs. Les fortes pluviométries enregistrées à Kolda et à Séfa pourraient avoir perturbé l'épiaison et la fécondation des épillets de ces variétés précoces (ADRAO, 1995 ; Chaudhary *et al.*, 2003).

Le rendement grains était fortement dépendant du taux de stérilité et du poids de mille grains lorsque les conditions d'expérimentation étaient plus sèches. Par contre lorsque les conditions expérimentales étaient relativement plus humides, le rendement grains était beaucoup plus corrélé au nombre d'épillets par panicule. Les relatives meilleures performances des variétés NERICAs par rapport aux autres variétés confirment qu'elles sont mieux adaptées aux conditions rustiques de culture (ADRAO, 2002 ; ADRAO, 2006 ; Volvey *et al.*, 2005). Elles ont été relativement plus stables que les variétés asiatiques et les autres types de variétés hybrides (DKA P2, DKA P3, DKA P17 et FKR 45N). Le fait que ces dernières aient été mises au point dans des environnements réduits à un seul pays (Burkina Faso ou Mali en fonction des cas) pourrait

expliquer leur contre-performance. Car même si les croisements qui ont permis leur obtention ne diffèrent pas fondamentalement de ceux des NERICAs, les NERICAs ont eu l'avantage d'être d'abord testés dans plusieurs environnements de culture d'Afrique de l'ouest et du centre avant d'être vulgarisés (Diagne *et al.*, 2010 ; Kaneda, 2007).

2.5 Conclusion

Les caractéristiques climatiques permettant de distinguer les sites d'étude ont été celles se rapportant à la pluviométrie. De ce fait, la durée de cycle, qui est plus dépendante de la température, a été très peu variable pour chaque variété étudiée. Les performances agronomiques ayant permis de distinguer les variétés entre elles ont été celles se rapportant au rendement grains et à ses composantes. Le caractère pluvieux et humide du climat a une part importante dans l'expression du potentiel de rendement mais celle-ci est fortement modulée par la capacité de rétention hydrique du sol. De toutes les variétés étudiées, les NERICAs ont eu les meilleures performances suivies des variétés asiatiques. Les hybrides autres que les NERICAs ont été contre-performantes quels que soient l'année et le site d'étude.

Chapitre 3 : Simulation de la croissance et du développement de variétés de riz pluvial à partir de modèles de culture dans différentes zones agroécologiques au Sénégal

3.1 Introduction

Les modèles de culture offrent des moyens pour quantifier les effets du climat, des caractéristiques du sol supportant les cultures, les techniques culturales et les géotypes ainsi que l'interaction de ces différents facteurs sur la croissance et le développement des plantes (Boote *et al.*, 2001 ; Hammer et Muchow, 1994). Ils peuvent être utilisés pour mesurer les écarts de rendements entre les valeurs potentielles et les résultats réels issus d'expérimentations agronomiques (Kouakou, 2013) ou même mesurer l'impact de l'évolution de certaines composantes climatiques sur les rendements des plantes (Timsina et Humphreys, 2010 ; Gérardaux *et al.*, 2012). Ils se révèlent plus économiques car ils permettent de travailler sur plusieurs cas de figure qui dans la réalité nécessiteraient de lourds investissements financiers et en temps de travail (Dingkuhn *et al.*, 1995 ; Alocilja et Ritchie, 1988). Il existe plusieurs modèles de culture dédiés aux céréales sèches cultivées en Afrique de l'Ouest. Au nombre de ces modèles, plusieurs reproduisent le fonctionnement de la plante en s'appuyant sur de simples équations caractérisant le bilan hydrique (Samba, 1998; Samba *et al.*, 2001). Des études récentes ont montré que ces types de modèles de culture s'étaient révélés très peu performants dans la simulation de la croissance et du développement des cultures surtout en condition soudano-sahéliennes (Forest et Cortier, 1991; Affholder, 1994; Barbier, 1998) lorsque des contraintes agronomiques n'étaient pas maîtrisées (Kouakou, 2013). Des modèles plus complexes, prenant en compte l'interaction eau-fertilité, permettent d'avoir des résultats plus probants. Au nombre de ceux-ci figurent les modèles CERES qui ont permis d'avoir des résultats appréciables au Sénégal sur le mil (Kouakou, 2013). Le modèle CERES-Rice fait partie des récents modèles dédiés au riz et présente la particularité de simuler les stades phénologiques, le rendement grains et ses composantes (Gouranga *et al.*, 2007) (Annexe 4). Son adoption devient de plus en plus généralisée au sein de la communauté des agro-modélisateurs. Cependant, l'utilisation de CERES-Rice en zone soudano-sahélienne et plus particulièrement au Sénégal est rare et quand

cela a été fait, le matériel végétal utilisé se limitait à des variétés à cycle long (Salack, 2006). Pourtant, les variétés de riz pluvial à cycle court connaissent un certain essor dans le paysage rizicole d’Afrique de l’Ouest et du Sénégal. De plus, aucun de ces travaux n’a porté sur les variétés de riz NERICA alors que ces dernières sont vues comme le matériel végétal support de la révolution verte en Afrique (Kijima *et al.*, 2006 ; ADRAO, 1999 ; ADRAO, 2001 ; Volvey *et al.*, 2005) et elles deviennent de plus en plus prépondérantes dans les rizières du Sénégal. Ce travail a pour objectif d’adapter le modèle CERES-Rice aux zones de riziculture pluviale au Sénégal.

3.2 Matériel et méthodes

3.2.1 Sites des essais

3.2.1.1 Situation géographique

Les travaux de modélisation se sont appuyés sur les données issues de 19 essais conduits en 6 sites de 2012 à 2014 dans trois zones agroécologiques du Sénégal (Bassin arachidier, Sénégal oriental et Casamance) (Tableau X). 8 autres essais portant sur les variétés à modéliser ont été ajoutés aux 11 essais (voir chapitre 2) ayant servi à l’étude du comportement variétal en fonction des zones agroécologiques. Les essais ont été conduits dans quatre stations de recherche de l’Institut Sénégalais de Recherches Agricoles (ISRA) et en deux sites paysans. Les essais en station ont été implantés à Darou Pakathiar (Bassin arachidier), Sinthiou Malème (Sénégal oriental), Kolda (Haute Casamance) et Séfa (Moyenne Casamance). Les expérimentations en milieu paysan ont été effectuées dans le Bassin arachidier, à N’Dama et à Diérico, villages situés à environ 15 km de Nioro du Rip (Tableau X). La situation géographique de ces sites est précisée à la figure 4 (chapitre 2). Les semis ont été effectués à deux dates décalées de deux semaines en 2013 et 2014 à Sinthiou Malème alors qu’une seule date (dès l’installation de la saison des pluies) a été retenue pour le semis des autres essais. Pour la calibration du modèle, 8 expérimentations ont été sélectionnées parmi les 19 et les observations des autres expérimentations ont été utilisées pour la validation du paramétrage. Les essais ont été qualifiés « d’essai biomasse » lorsque les variétés mises en expérimentation se limitaient à NERICA 1, NERICA 4, NERICA 8 et NERICA 11 et un « essai variété » portait sur l’étude de plusieurs autres variétés de riz en plus des quatre de l’essai biomasse. Dans la collecte des données, les

deux types d'essais se distinguaient par le fait que des observations plus rapprochées (stades phénologiques, paramètres végétatifs) ont été effectuées sur les essais biomasse. Les essais biomasse ont été implantés seulement en station de recherche alors que les essais variété étaient tant en station de recherche qu'en milieu paysan (Tableau X).

Tableau X : Liste des essais utilisés pour la calibration et la validation du modèle étudié

| Ordre alphanumérique | Code essai | Site | Année | Type | Calibration | Validation |
|----------------------|------------|-----------------|-------|------------------|-------------|------------|
| 1 | bko13 | Kolda | 2013 | biomasse | | 1 |
| 2 | bko14 | Kolda | 2014 | biomasse | | 1 |
| 3 | bse13 | sefa | 2013 | biomasse | 1 | |
| 4 | bsi113 | Sinthiou malème | 2013 | biomasse semis 1 | 1 | |
| 5 | bsi114 | Sinthiou malème | 2014 | biomasse semis 1 | 1 | |
| 6 | bsi213 | Sinthiou malème | 2013 | biomasse semis 2 | 1 | |
| 7 | bsi214 | Sinthiou malème | 2014 | biomasse semis 2 | | 1 |
| 8 | pdk14 | Diéricao | 2014 | paysan | | 1 |
| 9 | pnd14 | N'Dama | 2014 | paysan | | 1 |
| 10 | vda12 | Darou Pakathiar | 2012 | variété | 1 | |
| 11 | vda13 | Darou Pakathiar | 2013 | variété | 1 | |
| 12 | vko12 | Kolda | 2012 | variété | | 1 |
| 13 | vko13 | Kolda | 2013 | variété | 1 | |
| 14 | vko14 | Kolda | 2014 | variété | | 1 |
| 15 | vse12 | Séfa | 2012 | variété | | 1 |
| 16 | vse13 | Séfa | 2013 | variété | 1 | |
| 17 | vsi12 | Sinthiou malème | 2012 | variété | | 1 |
| 18 | vsi13 | Sinthiou malème | 2013 | variété | | 1 |
| 19 | vsi14 | Sinthiou malème | 2014 | variété | | 1 |

3.2.1.2 Données pédoclimatiques

Les principales caractéristiques des sols des sites des essais ont été obtenues via des analyses de sol effectuées sur des échantillons prélevés *in situ*. Ces analyses ont été effectuées au laboratoire d'analyse de sol de l'ISRA du CNRA de Bambey. Les informations portant sur la texture (granulométrie), le pH (eau), le pourcentage d'azote total, le pourcentage de carbone ainsi que celles portant sur la couleur du sol, la présence d'une éventuelle pente sur le site de prélèvement ont été collectées. Les températures maximales et minimales et les pluviométries ont été enregistrées à des pas de temps journaliers sur tous les sites via des mini stations automatiques

TINYTAG (Figure 15). A Sinthiou Malème on a pu effectuer en 2013 et 2014, des relevés plus fournis de paramètres climatiques via une station automatique CIMEL ENERCO 405 (© Cimet Electronique S.A.S France) (Figure 15): températures minimale et maximale, humidité relative moyenne, rayonnement solaire, vitesse moyenne du vent et hauteur de pluie. Les données collectées à travers les stations TINYTAG ont été complétées (humidité relative, vitesse du vent et insolation) avec les relevés des stations du réseau de la météorologie nationale du Sénégal les plus proches des sites de nos essais : celle de Nioro du Rip pour la zone de Nioro et celle de Kolda pour Kolda et Séfa.

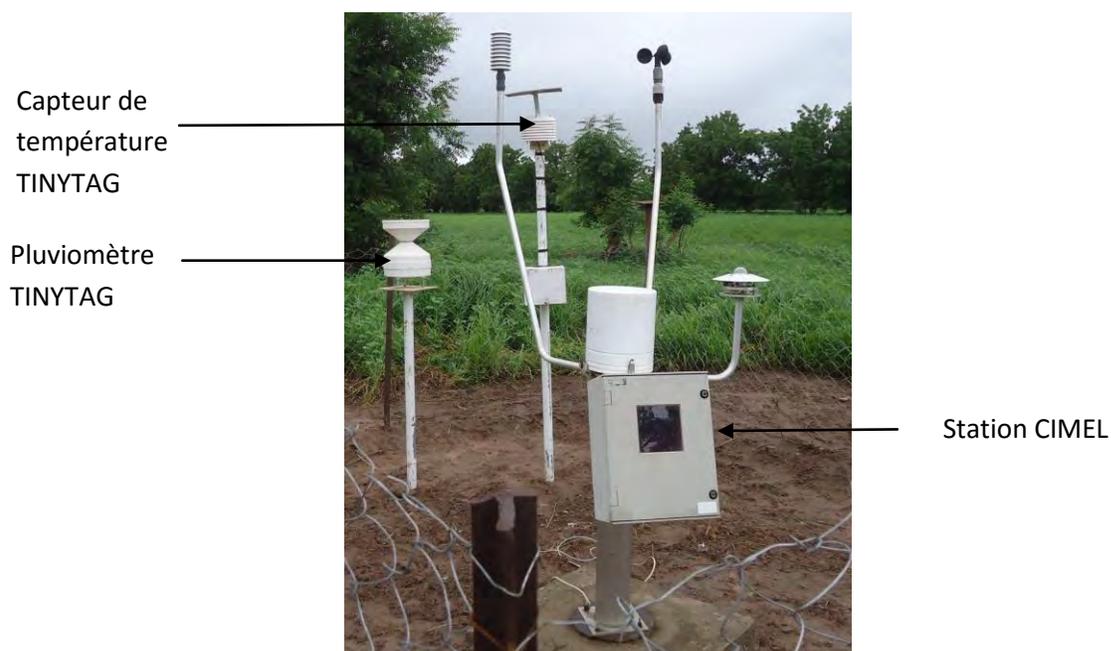


Figure 15 : Stations automatiques CIMEL (station complète, en avant-plan) et TINYTAG (composée d'un capteur de température et d'un pluviomètre) utilisées pour la collecte des paramètres climatiques sur les essais.

3.2.2 Matériel végétal

Le matériel végétal était représenté par des variétés de riz pluvial de plateau de type NERICA (« Nouveau Riz pour l'Afrique »). Les NERICA résultent d'un croisement interspécifique entre *Oryza sativa* (L.), variété de riz asiatique à haut rendement et *Oryza glaberrima* (Steud), variété de riz originaire d'Afrique, moins productive mais mieux résistante aux stress biotiques et abiotiques des conditions africaines de culture (Jones *et al.*, 1997a,b). Les variétés hybrides

NERICA sont à la fois productives comme leur parent asiatique et résistantes comme leur parent africain (AfricaRice, 2008). Nos travaux de modélisation ont porté sur quatre variétés de NERICA pluvial : NERICA 1, NERICA 4, NERICA 8 et NERICA 11. NERICA 14 a certes été la plus performante des variétés testées (chapitre 2) mais elle n'a pas été choisie pour les travaux de modélisation à cause de la faiblesse de son potentiel de production grains comparativement à celui de NERICA 11. En effet, le potentiel de production grain de NERICA 14 est de 3,5 t.ha⁻¹ contre 7 t.ha⁻¹ pour NERICA 11 (AfricaRice, 2008). Les deux premières variétés choisies ont un cycle moyen de 95-100 jours et les deux autres sont plus précoces avec un cycle moyen de 75-85 jours. La phase végétative du cycle de NERICA 1 et de NERICA 4 dure entre 30 et 45 jours et ces variétés atteignent le stade mi-épiaison à 70-75 jours après semis. NERICA 8 et NERICA 11 ont une phase végétative d'une durée moyenne de 20-35 jours et atteignent la mi-épiaison à 55-60 jours après semis (AfricaRice, 2008 ; Arradeau et Vergara, 1992). Parmi ces variétés, seule NERICA 1 a déjà été homologuée au Sénégal, bien qu'elle présente une plus grande sensibilité aux termites. La variété NERICA 4 est largement cultivée et très appréciée en milieu paysan. NERICA 11 se distingue des trois autres par son fort rendement potentiel (7 t.ha⁻¹). NERICA 8 est proche de NERICA 4 du point de vue du rendement potentiel (5 t.ha⁻¹) et de NERICA 11 de par la durée du cycle semis-maturité (75-85 jours). Les semences utilisées au cours de ces essais provenaient de la collection d'AfricaRice Bénin.

3.2.3 Description des essais

3.2.3.1 Conduite agronomique

Les essais ont été installés sur des précédents jachère ou légumineuses (arachide ou niébé), dès la date d'installation des pluies pour les premiers semis et deux semaines après les premiers semis pour les deuxièmes dates de semis (uniquement à Sinthiou Malème). Les essais étaient construits suivant un dispositif en blocs de Fisher complètement randomisé après un labour du site aux disques suivi d'un hersage sur une profondeur de 20 cm. La géométrie de semis adoptée dans tous les cas était de 0,25 m entre les lignes et 0,20 m entre les poquets d'une même ligne, soit une densité de 200 000 poquets.ha⁻¹. Les plants ont été démarriés à trois pieds par poquet, en condition humide, avant le tallage. La gestion des essais a été effectuée suivant les normes agronomiques de la recherche scientifique au Sénégal. Il s'agissait d'offrir aux plants des

conditions optimales de croissance. Des applications de carbofuran (Furadan) ont dès lors été administrées, au semis et au besoin, pour contrôler les attaques de déprédateurs, dont en particulier les termites. Des désherbages manuels ont été effectués au besoin pour éviter la compétition des adventices. Les fertilisations chimiques ont été effectuées suivant les doses optimales recommandées par l'ISRA : 200 kg.ha⁻¹ d'engrais N-P-K (15-15-15) au semis et 150 kg.ha⁻¹ d'urée (46% N) à raison de 100 kg.ha⁻¹ à début tallage et de 50 kg.ha⁻¹ à début épiaison. La gestion de la ressource hydrique, provenant des pluies, a été renforcée par l'aménagement de diguettes anti-érosives autour des essais pour limiter le ruissellement.

3.2.3.2 Caractéristiques des essais

Les essais ont été caractérisés par des indicateurs quantitatifs et qualitatifs permettant d'avoir une appréciation de la fertilité du sol, du taux d'humidité du site, de la précocité (ou du retard) de l'installation de l'essai et de la qualité de la gestion agronomique de l'expérimentation (Tableau XI).

Tableau XI : Quelques indicateurs ayant servi à établir une typologie des essais

| Indicateur | Signification | Unité | Valeur favorable | Valeur défavorable |
|------------|--|-------------|------------------|--------------------|
| SEM | date calendaire de semis | jours | moins élevée | plus élevée |
| AL | taux d'argile et de limon contenu dans le sol | % | plus élevée | moins élevée |
| MO | taux de matière organique contenue dans le sol | % | plus élevée | moins élevée |
| STRI | absence de Striga dans les parcelles | sans valeur | 5 | 1 |
| TERM | absence d'attaque de termites sur les plants | sans valeur | 5 | 1 |
| GEST | qualité de la gestion agronomique de l'essai | sans valeur | 5 | 1 |
| PLUIE | quantité d'eau de pluie reçue par les plants | mm | plus élevée | moins élevée |

Les valeurs prises par chaque essai au niveau de chacun des indicateurs (Annexe 5) ont été synthétisées à travers une analyse en composantes principales qui restitue les deux tiers de l'information initiale renseignée. Les deux axes F1 et F2 sont d'égale importance compte tenu de leur contribution relativement similaire à la restitution des informations sur les différents essais.

L'axe F1 est fortement corrélé à la fertilité du sol et à la qualité de la gestion agronomique et l'axe F2 est corrélé à l'humidité du site et à la date calendaire d'installation de l'essai. Les essais étudiés ont donc pu être sériés en cinq groupes dont quatre sont des combinaisons des sous-dimensions des deux axes F1 et F2 (Figure 16) :

- Groupe 1 : essais de très bonne qualité caractérisés par une date de semis acceptable, une bonne pluviosité enregistrée sur le site, une bonne fertilité du sol et une bonne gestion agronomique. Les essais variété (vse13) et biomasse (bse13) de Séfa 2013 et l'essai variété de Kolda 2012 (vko12) appartiennent à ce groupe ;
- Groupe 2 formé par les essais semés tardivement sur des sols fertiles avec une bonne gestion agronomique dans un environnement climatique sec : les essais variété (vko14) et biomasse (bko14) de Kolda, l'essai variété de Sinthiou Malème en 2014 (vsi14) ;
- Groupe 3 regroupant des essais dont les contraintes majeures étaient définies par la faiblesse de la fertilité du sol et la gestion agronomique passable. L'essai variété de Darou Pakathiar de 2013 (vda13) appartient explicitement à ce groupe ;
- Groupe 4 regroupant des essais ayant fournis des performances variétales les plus faibles du fait des nombreuses contraintes qu'ils ont subies : semis tardif, déficit hydrique prononcé, et dans certains cas, faible fertilité du sol et gestion agronomique passable. L'on retrouve au sein de ce groupe les essais biomasse 1 (bsi114) et 2 (bsi214) de Sinthiou Malème 2014, l'essai biomasse 2 de Sinthiou Malème 2013 (b213), l'essai de N'Dama en 2014 (pnda14) et l'essai de Diéricao en 2014 (pdk14).

Sept essais formant le groupe 5 ne sont pas dans le plan formé par les axes F1 et F2 mais sont à cheval sur les groupes 1, 2 et 3. Les essais du groupe 5 sont en effet caractérisés par une bonne gestion agronomique et une bonne fertilité des sols comme ceux des groupes 1 et 2 et une date de semis acceptable et un caractère humide à l'instar des groupes 1 et 3 (Annexe 5). En définitive, les essais du groupe 5, bien qu'ils ne soient pas dans le plan formé par les axes F1 et F2, peuvent être classés dans le groupe 1, vu leurs caractéristiques. Ce sont : les essais variété de l'année 2012 à Darou Pakathiar (vda12), Sinthiou Malème (vsi12) et Séfa (vse12) ; les essais variété (vsi13) et biomasse 1 de Sinthiou Malème 2013 (bsi113) et les essais variété (vko13) et biomasse

de Kolda 2013 (bko13)). Parmi ces essais, ceux qui ont été conduits en 2012 ont été plus arrosés que ceux de 2013.

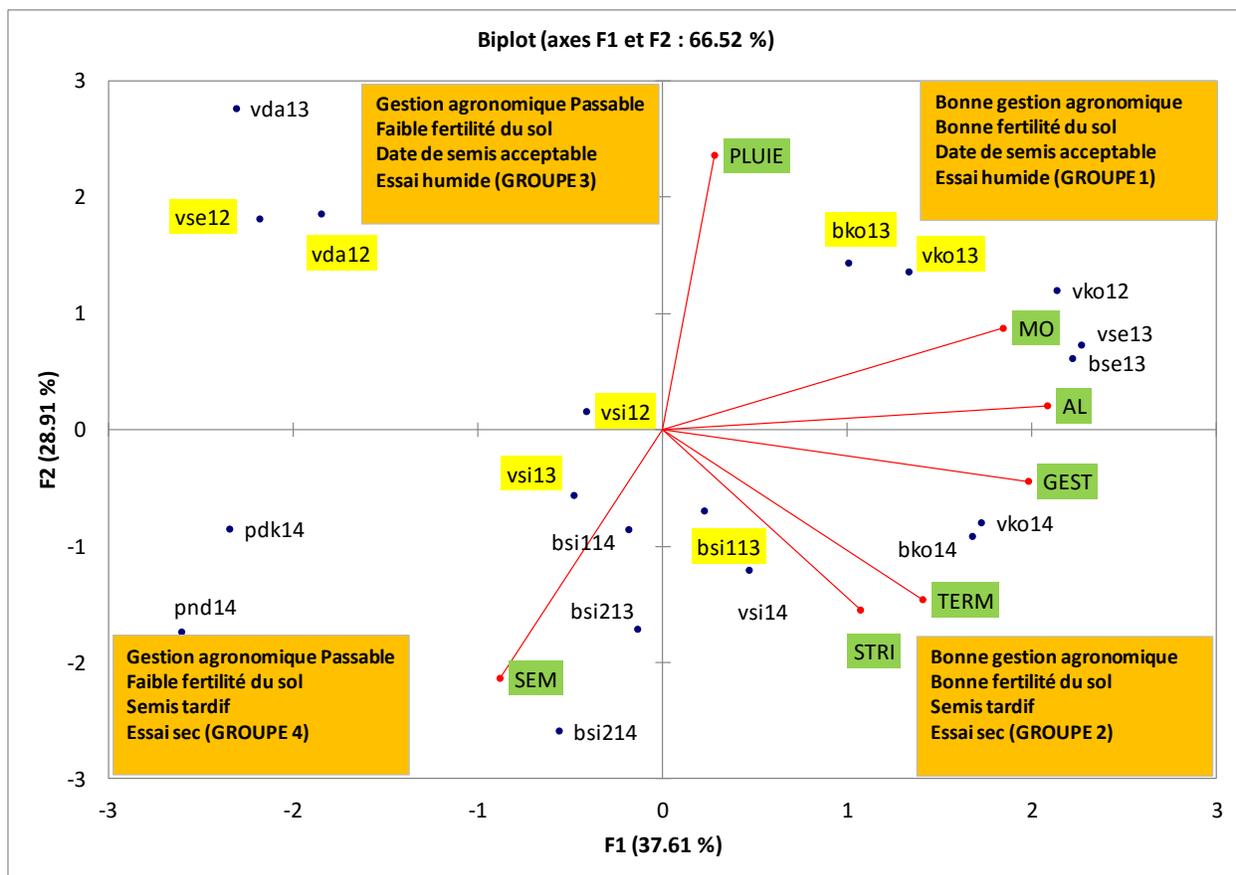


Figure 16 : Analyse en composantes principales montrant les caractéristiques des essais utilisés dans la procédure de modélisation. Les essais et les indicateurs sont explicités respectivement aux tableaux X et XI. Les essais en surbrillance jaune appartiennent au Groupe 5.

3.2.4 Description du modèle de culture utilisé et procédure de modélisation

3.2.4.1 Présentation du modèle CERES-Rice

CERES (*Crop Estimation through Resource and Environment Synthesis*)-Rice est l'un des modèles incorporés dans la plateforme de modèles de culture dénommée *Decision Support System for Agrotechnology Transfert* (DSSAT) (Jones *et al.*, 2003 ; Hoogenboom *et al.*, 2010). DSSAT a été mis au point par un groupe de chercheurs de plusieurs nationalités réunis au sein de l'IBSNAT (Jones, 1993). CERES-Rice a été conçu pour tous les types de riziculture et s'appuie

sur les bilans radiatif, carboné, hydrique et azoté pour simuler la croissance, le développement et le rendement d'une parcelle de riz sur un pas de temps journalier (Alocilja et Ritchie, 1988 ; IBSNAT, 1990). A partir de plusieurs systèmes d'équations mathématiques liés les uns aux autres, le modèle simule le fonctionnement de la culture dans la parcelle en s'appuyant sur quatre séries de données : les informations sur le sol (caractéristiques physico-chimiques, profondeur, pente), les conditions climatiques (températures minimales et maximales journalières, humidité moyenne, vent moyen, rayonnement solaire, pluviométrie), des caractéristiques de la plante cultivée (simplifiées au travers d'un nombre réduit de paramètres) et les données décrivant les techniques culturales pratiquées (préparation du sol, mise en place de la culture, modalités d'entretien, récolte). Les principales sorties du modèle CERES-Rice exploitées par la plupart des agro-modélisateurs concernent la phénologie (surtout les stades de floraison et de maturité), l'indice de surface foliaire (LAI), la production de biomasse et sa répartition entre racines, tiges (talles), feuilles, panicules et grains (Saseendran *et al.*, 1998).

Les stades phénologiques sont déclenchés les uns à la suite des autres à partir d'un niveau de températures accumulé et dépendent de trois valeurs de température essentielle : le seuil minimale de température dite température de base, une température optimale de croissance et une température seuil à ne pas dépasser. Les stades phénologiques simulés par CERES-Rice sont : la germination, la levée, la fin de la phase juvénile, l'initiation paniculaire, l'épiaison, le début de la phase de remplissage des grains et la maturité physiologique des grains.

La croissance de la plante est simulée sur la base d'un bilan carboné selon l'approche source-puits. Le stock carboné est réalisé par l'accumulation d'hydrates de carbone à travers le phénomène de la photosynthèse, processus dans lequel la lumière interceptée par le couvert végétal est convertie en hydrates de carbone. Ce phénomène dépend essentiellement de la radiation solaire et de la température et est modulé par les facteurs de stress surtout ceux liés à la nutrition hydrominérale de la plante (Saseendran *et al.*, 1998). Les processus physiques et équations mathématiques utilisés pour quantifier les niveaux de stress (bilans hydrique et azoté) sont ceux développés par Jones et Kiniry (1986). Les conditions de culture (disponibilité en eau et en nutriments, conditions atmosphériques), les aptitudes génétiques de la plante combinées au bilan carboné de la phase de floraison contribuent à fixer dès ce stade phénologique le nombre de

grains produits par plante. Le rendement en grains obtenu au stade maturité est une relation linéaire simple entre ce nombre de grains, le poids d'un grain et la densité de semis (Jones *et al.*, 2003).

Au niveau du sol, un bilan hydrique est élaboré sur la base du modèle de Ritchie (1998) selon lequel le sol est formé d'un empilement de couches homogènes. L'infiltration de l'eau reçue en surface se fait verticalement après extraction du ruissellement selon la méthode USDA-SCS (Soil Conservation Service, 1972), telle que modifiée par Williams *et al.* (1984). Ensuite elle se poursuit d'une couche à la suivante à la condition que la couche supérieure ait atteint sa capacité au champ : la couche inférieure reçoit alors la quantité d'eau en surplus issue de la couche supérieure. Les flux d'évaporation du sol et de transpiration de la culture sont distincts et calculées à partir de l'évaporation potentielle en tenant compte des quantités d'énergie reçues par la surface du sol et interceptées par le couvert végétal.

La fertilité du sol prend en compte un bilan azoté et un autre lié à la matière organique. Deux modules permettent de simuler cette fertilité du sol : celui de GODWIN (Godwin et Jones, 1991) et celui de CENTURY développé par Gijssman *et al.* (2002) et basé sur le modèle de Parton *et al.* (1988). Nous avons fait le choix d'utiliser le module de CENTURY, 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. CENTURY assure la décomposition de la matière organique sur la base de la température et de l'humidité du sol. Le module est alors alimenté par des variables d'entrée qui dépendent des propriétés du sol et du résultat du bilan hydrique. Les flux d'eau assurent le transport des fertilisants à travers les couches de sol.

A cela vient s'ajouter un paramètre appelé « facteur de fertilité du sol » (SLPF), variant de 0 à 1, qui permet de prendre aussi en compte, de façon grossière et empirique, les effets des éléments nutritifs autres que l'azote et/ou d'autres caractéristiques sur la production de biomasse de la plante : sa réduction permet de diminuer les biomasses et rendements simulés. Ce paramètre SLPF peut également être ajusté pour rendre compte d'autres contraintes non liées au sol telles que des problèmes biotiques.

3.2.4.2 Calibration du modèle CERES-Rice

9 paramètres appelés « coefficients génétiques » permettent de gérer les stades phénologiques (6 paramètres) et les productions de biomasses (3 paramètres) (Tableau XII). Leurs valeurs permettent de décrire les cultivars et les distinguer entre eux. Pour la calibration un premier jeu de coefficients génétiques est choisi en tenant compte des caractéristiques du cultivar (écologie, longueur de cycle, zone de culture, etc.) : on peut s'aider pour cela des valeurs citées dans le modèle pour différents autres cultivars en fonction de la proximité des cultivars entre eux. Ensuite, sur la base des données de l'expérimentation, un autre jeu de coefficients génétiques peut être automatiquement généré par le module *Generalized Likelihood Uncertainty Estimation* (GLUE) de DSSAT 4.6 (Hoogenboom *et al.*, 2015) au travers de plusieurs itérations visant à minimiser les écarts entre les valeurs simulées et les données observées. La calibration doit être réalisée à partir de données provenant d'essais conduits dans de bonnes conditions agronomiques afin que ces données ne soient pas affectées par des facteurs (par exemple des adventices) non pris en compte par le modèle. Pour la calibration des paramètres contrôlant les stades phénologiques il faut de plus se rapporter à des données d'essais non affectés par des stress hydrique car on sait que de tels stress peuvent agir sur les durées des phases phénologiques. La calibration des paramètres contrôlant les stades phénologiques porte en général sur la date de la floraison mâle et la date de maturité des grains. Lorsque les coefficients génétiques pilotant les stades phénologiques ont été validés, on poursuit la calibration en s'intéressant aux paramètres qui gèrent les productions des biomasses, en particulier le rendement grains (Hunt *et al.*, 1993).

Tableau XII : Coefficients génétiques sous CERES-Rice (Hoogenboom *et al.*, 2015).

| Coefficient | Signification | Agit sur |
|-------------|---|------------|
| P1 | Somme de températures de la période juvénile insensible à la photopériode | Phénologie |
| P2O | Photopériode critique | Phénologie |
| P2R | Coefficient de sensibilité à la photopériode | Phénologie |
| P5 | Somme de températures du début remplissage des grains à la maturité | Phénologie |
| G1 | Nombre potentiel d'épillets par gramme de biomasse tige | Biomasse |
| G2 | Poids potentiel d'un grain | Biomasse |
| G3 | Coefficient relatif de tallage | Biomasse |
| G4 | Coefficient de tolérance à la température | Phénologie |
| PHINT | Phyllochrone | Phénologie |

3.2.4.3 Validation du modèle CERES-Rice

Les paramètres issus de la calibration doivent être validés en comparant les données observées sur des situations n'ayant pas servi à la calibration aux résultats simulés par le modèle pour ces situations. Les écarts entre les valeurs prédites et les valeurs observées ont été appréciés à travers des représentations graphiques combinées à des statistiques quantitatives (Bouman and van Laar, 2006; Timsina *et al.*, 2008; Feng *et al.*, 2007). Deux indicateurs statistiques ont été utilisés pour apprécier la performance du modèle : la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne relative (RRMSE, exprimée en %) et l'indice d'agrément (IA, sans unité) (Willmott, 1982). La capacité de prédiction du modèle est satisfaisante pour des valeurs de RRMSE (Eq. 3-1) et IA (Eq. 3-2) respectivement proches de 0% et 1.

$$RRMSE = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{n}}}{\bar{O}} \quad (\text{Eq. 3-1})$$

$$IA = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|S_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (\text{Eq.3-2})$$

où S_i = valeur simulée, O_i = valeur observée, \bar{O} = moyenne des valeurs observées, n = nombre de situations considérées.

3.3 Résultats

Le processus de calibration-validation a été fait en deux temps. Il a porté d'abord sur la phénologie afin d'avoir des cycles et des phases simulés dont les durées sont comparables à celles observées dans la réalité. Ensuite le processus de calibration-validation a porté sur les rendements et les biomasses. En effet ce sont des paramètres différents qui affectent d'une part les aspects phénologiques, d'autre part les productions de biomasse. Par ailleurs si en modifiant les stades phénologiques on peut avoir un impact sur les productions de biomasses, l'inverse n'est pas vrai, à savoir que les paramètres permettant de gérer les biomasses n'ont pas d'effet sur la phénologie.

3.3.1 Calibration-validation de la phénologie

La calibration de la phénologie s'est concentrée sur deux variétés type : une variété de cycle d'environ 75-85 jours, que l'on désignera par « variété courte », et une variété de cycle d'environ 95-100 jours, que l'on désignera comme « variété longue ». Les données observées de la « variété courte » ont été constituées à partir des moyennes des données de NERICA 8 et NERICA 11 et les données observées de la « variété longue » ont été obtenues à partir des moyennes des données de NERICA 1 et NERICA 4.

Faute d'observations fiables concernant les maturités, les paramètres P5 gérant les durées entre début remplissage des grains et maturité ont été fixés arbitrairement de façon à obtenir des durées entre anthèse et maturité de respectivement 27 et 28 jours pour les variétés courte et longue. En pratique on s'est rendu compte que le modèle ne donnait pas exactement la date de début de floraison mâle, mais d'une part la date d'épiaison (« heading » en anglais, noté avec le numéro de phase 4 dans les sorties du modèle ; correspond aussi au moment où la biomasse

feuilles est à son maximum), et d'autre part la date de début de remplissage des grains (phase numéro 5 pour le modèle), et qu'il y avait un écart moyen de 7-8 jours entre ces deux dates. Nous avons donc considéré que le début de la floraison mâle correspondait pour le modèle à la moitié de la période entre les deux dates citées (en pratique 3 ou 4 jours après l'épiaison). Cela est cohérent avec la physiologie du riz car dans la réalité l'anthèse commence très rapidement après épiaison et par ailleurs il y a une latence de 3-4 jours également entre l'anthèse et le début du remplissage des grains. Après ces différents ajustements, les valeurs des paramètres P1 et P5 correspondaient respectivement à 143,6°C.j et 400°C.j pour la variété courte et 293,6°C.j et 424°C.j pour la variété longue.

Ces paramétrages issus du processus de calibration donnent des résultats satisfaisants sur les 11 situations utilisées pour la validation. En moyenne les écarts entre dates simulées et observées sont très faibles (1 à 2 jours en moyenne). On note cependant pour la variété longue une situation pour laquelle l'écart est de 4 jours. De façon générale on constate qu'il y a une uniformisation des cycles simulés qui présentent moins de variation que les observés. Par ailleurs, le calage de la date de floraison de la variété à cycle long est meilleur à celui de la variété à cycle court compte tenu de sa valeur de IA plus proche de 1 (0,70 contre 0,30 pour la variété à cycle court) (Figure 17).

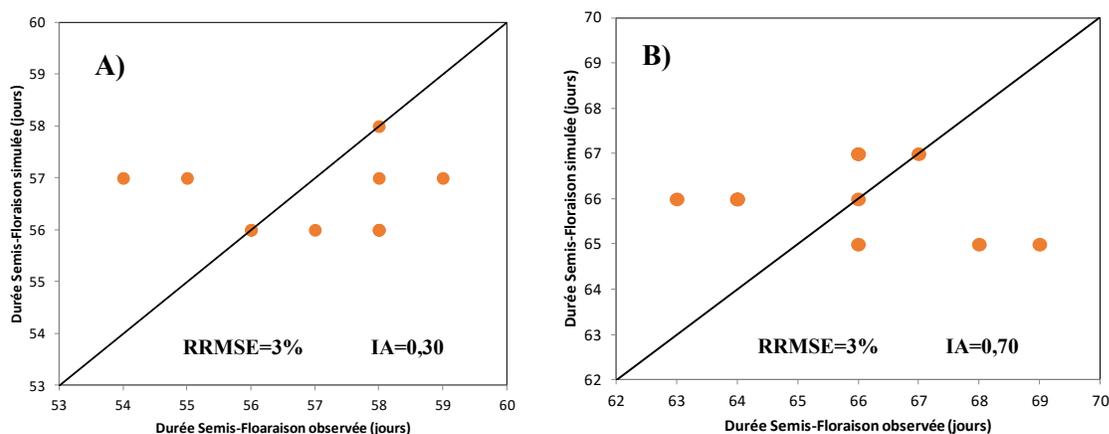


Figure 17 : Durées semis-floraison simulées en fonction des données observées sur la variété courte (A) et la variété longue (B).

3.3.2 Conditions d'opérationnalité de CERES-Rice pour la calibration de la biomasse

Dans DSSAT-CERES-Rice seuls trois paramètres gouvernent les productions de biomasse : G1, G2 et G3. Nous avons travaillé uniquement sur les valeurs des paramètres G1 et G3 et fixé la valeur de G2 à 0,028 gramme, ce en référence aux valeurs maximales de poids de mille grains que nous avons mesurées qui par ailleurs sont conformes aux valeurs figurant sur les catalogues officiels des NERICAs 1, 4, 8 et 11.

L'étape automatique de la procédure de calibration avec le logiciel GLUE a permis d'avoir des valeurs de G1 et G3 que l'on a ensuite essayé d'améliorer manuellement. Au cours de ce travail nous avons cependant pu nous rendre compte que le modèle CERES-Rice présentait des défauts de fonctionnement très importants.

3.3.2.1 Problème concernant les interactions hydriques sol-plante

Les premières simulations effectuées à partir des données des 19 essais (*cf* Tableau X), ont mis en évidence une impossibilité d'avoir des rendements simulés faibles pour les situations sur lesquelles nous avons eu de très faibles rendements liés selon toute vraisemblance (compte tenu des faibles pluviométries enregistrées et au vu des états des plantes) à des stress hydriques. Nous avons alors exploré en détail le bilan hydrique du modèle et ses interactions avec le développement de la culture. Ce travail nous a permis de constater que le modèle ne commençait à stresser la plante, et donc à affecter sa production de biomasse, que lorsque 80% de la réserve utile du sol (quantité d'eau utilisable par la plante, dont la borne supérieure est le stock d'eau à capacité au champ, et la borne inférieure le stock au point de flétrissement permanent) était déjà consommée. La figure 18 illustre cette réalité pour la situation de l'essai biomasse 2 de Sinthiou Malème en 2014. Pourtant le riz est considéré comme une des plantes les plus sensibles à la contrainte hydrique et on peut penser qu'il commence à montrer des signes d'un déficit hydrique quand 30% à 40% de la réserve utile ont été entamés. Par comparaison, il faut rappeler que pour un maïs on considère que celui-ci ressent une contrainte à 50% et pour un sorgho et un mil à 60%. Cette caractéristique du modèle fait qu'il nous a été pratiquement impossible d'obtenir des réductions de rendement sur les situations pour lesquelles nous supposons un stress hydrique : par exemple pour les essais « biomasse 2 » de Sinthiou Malème 2013 et 2014 les rendements simulés ne s'effondrent pas comme dans la réalité et pour les essais de Darou Pakathiar on

n'arrive pas à obtenir de stress hydrique, ce même en réduisant de manière exagérée la réserve utile à 36 mm (obtenue pour une combinaison d'une réserve utile nominale de 90 mm.m⁻¹ et d'une profondeur d'enracinement de 40 cm) (Figure 19).

Vu que le modèle ne commence à stresser les plants que lorsque 80% de la réserve utile du sol est épuisée, il est vraisemblable que les données provenant des essais dont les plants ont beaucoup souffert de déficit hydrique ne seraient alors pas adaptées pour alimenter le modèle CERES-Rice dans sa version actuelle pour lancer une procédure de calibration. Pour contourner cette contrainte du modèle, nous avons décidé de ne travailler que sur les essais de Séfa de l'année 2013 sur lesquels les conditions suivantes ont été réunies : bonne pluviométrie, saison des pluies la plus longue sur l'ensemble de tous les essais conduits sur les trois années, essai installé sur une jachère de longue durée, maîtrise des attaques de ravageurs, très peu de mortalités de plants au sein du carré de rendement et taux de stérilité (des grains) très faibles.

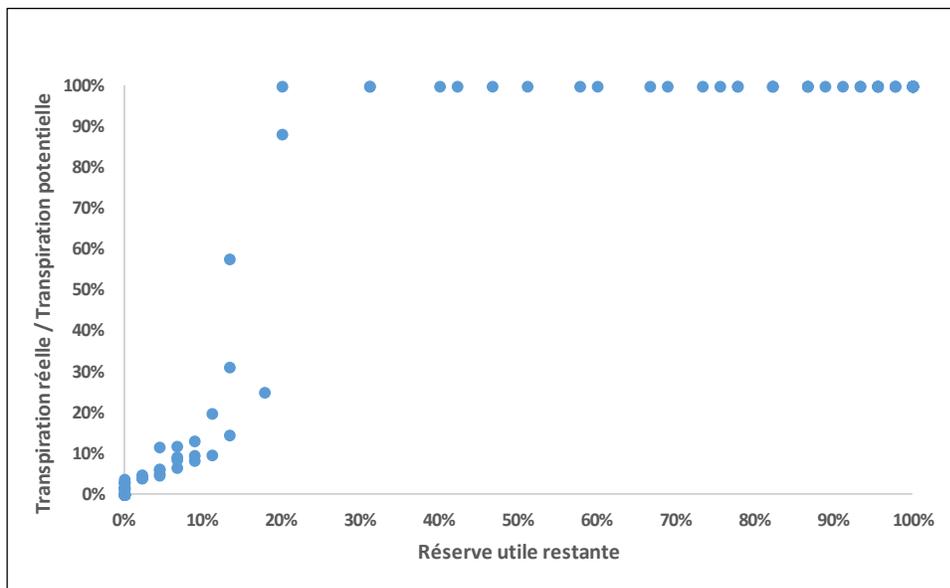


Figure 18 : Mise en évidence de l'insensibilité du modèle CERES-Rice à la réserve hydrique du sol à partir des données de l'essai biomasse 2 de l'année 2014 conduit à Sinthiou Malème, essai ayant souffert dans la réalité d'un stress hydrique prononcé.

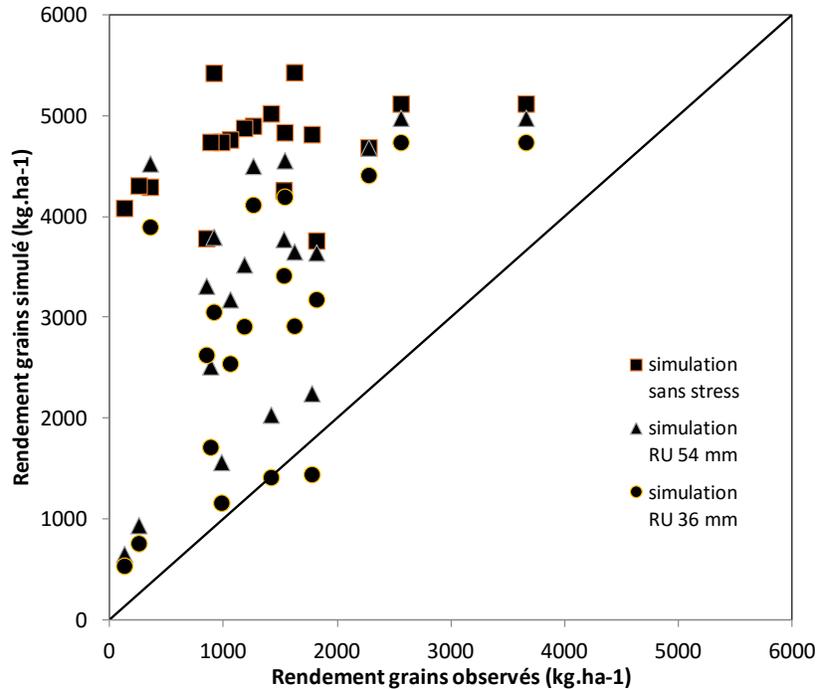


Figure 19 : Comparaison des rendements grains simulés et observés sur les données issues des 19 essais sélectionnés pour les travaux de modélisation en fonction de la réserve utile (RU) du sol.

3.3.2.2 Non fonctionnalité du paramètre SLPF

Nous avons pu observer que le paramètre SLPF n'avait pas d'effet sur les biomasses produites. Il est donc inopérant avec CERES-Rice. Il s'agit là certainement d'une erreur informatique car ce paramètre est opérationnel sur d'autres versions de CERES telles que CERES-millet.

3.3.2.3 Insensibilité aux paramètres gouvernant le remplissage des grains

Une analyse de sensibilité a mis en évidence que dans les variables de sortie, la variable « poids unitaire d'un grain » (GWGD, « unit grain weight ») ne représentait pas correctement ce qu'elle était censée représenter, puisque sa valeur était toujours supérieure à G2. En parallèle nous avons pu constater que la variable de sortie « nombre de grains au m² » (G#AD, « grain number ») était toujours égale au ratio entre le rendement grain et la valeur G2. Pour le modèle donc tout se passe comme s'il n'y avait que des grains 100% pleins et à leur taille potentielle. Cela laisse sous-entendre que la calibration de CERES-Rice ne donnerait de résultats satisfaisants que sur des essais conduits dans des conditions d'alimentation hydrominérale optimales. Les essais conduits à Séfa en 2013 ont connu de très bonnes conditions pluviométriques doublées d'une

gestion agronomique rigoureuse et les poids de mille grains des NERICAs issus de ces essais étaient similaires aux valeurs figurant sur les catalogues officiels d’AfricaRice. L’insensibilité de CERES-Rice vis-à-vis des paramètres intervenant dans le processus de remplissage des grains affecterait alors très peu les données des deux essais installés à Séfa en 2013. Nous avons alors décidé de calibrer le modèle avec les données issues de l’essai « variété Séfa 2013 », l’essai ayant bénéficié des meilleures conditions agronomiques et climatiques (Figure 16).

3.3.3 Calibration du rendement grains pour une variété de cycle court

Nous avons fait le constat que le modèle n’était pas capable de simuler un rendement grains élevé pour la variété de cycle court. En effet il faut utiliser des valeurs extrêmes et qui semblent totalement irréalistes pour G1 et G3 pour obtenir un rendement de 3 tonnes par hectare pour la variété de 85 jours. Cette réalité est illustrée au tableau XIII qui montre qu’il faut en particulier utiliser des valeurs G1 supérieures à 95 pour dépasser 3 tonnes alors qu’une valeur de 55 est recommandée comme valeur moyenne pour G1. Dans le fonctionnement du modèle une anomalie limite donc fortement la production de biomasses dès lors que le cycle est court. En l’état le modèle n’est donc pas capable de simuler correctement les performances de variétés de cycle court. Nous avons alors décidé de poursuivre la calibration avec la variété à cycle long.

Tableau XIII : Rendements obtenus pour différentes combinaisons de valeurs G1 et G3 pour la variété de cycle court (en gras les rendements obtenus pour des valeurs réalistes de G1 et G3)

| G1\ G3 | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 0,8 | 0,9 | 1 |
|---------------|------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 35 | 1307 | 1250 | 1127 | 1035 | 977 | 937 | 908 | 886 | 869 |
| 45 | 1839 | 1760 | 1724 | 1587 | 1513 | 1454 | 1411 | 1379 | 1355 |
| 55 | 2126 | 2039 | 1999 | 1978 | 1954 | 1886 | 1838 | 1802 | 1774 |
| 65 | 2389 | 2293 | 2248 | 2225 | 2200 | 2131 | 2082 | 2046 | 2019 |
| 75 | 2652 | 2546 | 2497 | 2472 | 2445 | 2376 | 2327 | 2291 | 2264 |
| 85 | 2915 | 2800 | 2746 | 2718 | 2691 | 2621 | 2572 | 2536 | 2509 |
| 95 | 3178 | 3053 | 2995 | 2965 | 2936 | 2866 | 2816 | 2781 | 2754 |
| 105 | 3441 | 3307 | 3244 | 3212 | 3182 | 3111 | 3061 | 3025 | 2999 |
| 115 | 3704 | 3560 | 3493 | 3458 | 3427 | 3356 | 3306 | 3270 | 3240 |
| 125 | 3760 | 3636 | 3578 | 3547 | 3544 | 3600 | 3481 | 3352 | 3252 |

3.3.4 Calibration du rendement grains pour une variété de cycle long

3.3.4.1 Calibration du rendement grains en absence de stress hydrique et azoté

La calibration en condition d'absence de stress hydrique et azoté a été effectuée en vue d'étudier la capacité du modèle CERES-Rice à simuler les rendements potentiels des variétés étudiées. Les valeurs des rendements potentiels de NERICA 1 et 4 proviennent du catalogue officiel d'AfricaRice. Le paramétrage des variétés pour la production de biomasse a porté sur les coefficients génétiques G1 et G3. Le coefficient G1 (nombre potentiel d'épillets par gramme de matière sèche de la talle principale) détermine la taille de la panicule en rapport avec la vigueur de la tige. Ce coefficient génétique renseigne aussi sur la productivité de la variété. L'évaluation des performances agronomiques des variétés testées sous différentes conditions agroécologiques (*cf* Chapitre 2) a montré une relative meilleure productivité chez les variétés NERICA en rapport avec un nombre élevé d'épillets par panicule comparativement aux autres variétés testées. Nous avons alors décidé d'utiliser des valeurs de G1 supérieures à 55 (valeur pour les variétés à rendement grains moyen) mais inférieures aux valeurs communément rencontrées en riziculture irriguée (à partir de 70). Par ailleurs, la détermination du coefficient G3 a été effectuée en tenant compte du fait que les variétés NERICAs 1 et 4 faisaient partie du groupe de variétés ayant un meilleur tallage en 2012 et 2013 et en 2014, leur nombre de talles ne différait pas statistiquement de celui d'INTA FORTALEZA, la variété ayant le plus tallé en cette année (Tableau VII). Le coefficient G3 d'aptitude au tallage a dès lors été fixé autour de la valeur 1. Après plusieurs combinaisons des valeurs, sur la base des hypothèses de travail ci-dessus énoncées, les valeurs de G1 et G3 ayant permis d'avoir de bons ajustements des rendements grains potentiels pour NERICA 1 et NERICA 4 sont respectivement de 60 et 0,90.

3.3.4.2 Calibration du rendement grains avec des données provenant des essais ayant moins souffert de stress hydrique

Les valeurs de G1 et G3 obtenues avec la calibration en situation sans stress ont été reconduites et les sorties du modèle ont été comparées à celles dérivant d'autres combinaisons de valeurs de G1 et G3. Les données issues de l'essai variété conduit en 2013 à Séfa ont été utilisées pour les simulations. Les meilleurs ajustements du rendement grains ont été obtenus avec les mêmes

valeurs de G1 et G3 telles que obtenues en situation d'absence de stress hydrique et de fertilité (Figure 20).

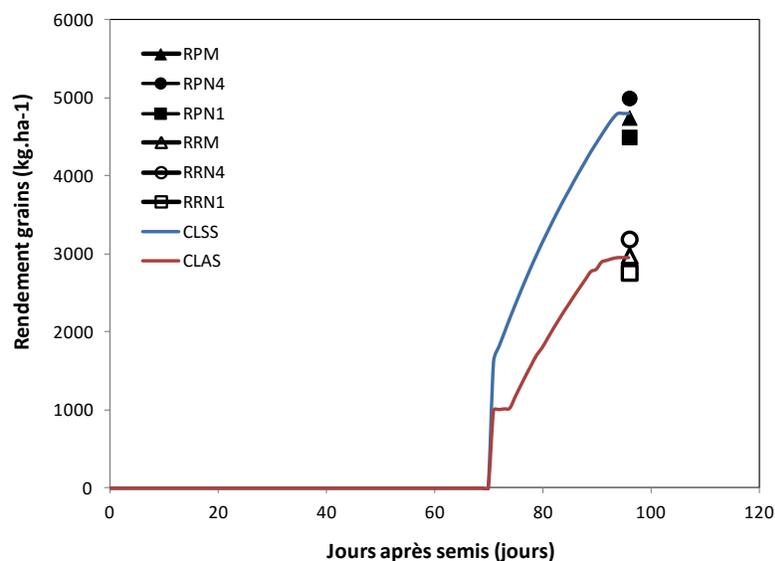


Figure 20 : Résultats de la calibration du modèle CERES-Rice sur le rendement grains des variétés à cycle long en condition non limitante et en condition de stress éventuel. *RPM* : rendement potentiel moyen ; *RPN4* : rendement potentiel de *NERICA 4* ; *RPN1* : rendement potentiel de *NERICA 1* ; *RRM* : rendement réel moyen ; *RRN4* : rendement réel de *NERICA 4* ; *RRN1* : rendement réel de *NERICA 1* ; *CLSS* : rendement de variété à cycle long en absence de stress ; *CLAS* : rendement de variété à cycle long avec présence de stress.

3.3.4.3 Calage du nombre de talles d'une variété de cycle long sur des essais ayant moins souffert de stress hydrique

Le paramétrage du modèle obtenu sur le rendement grains en condition non limitante et avec les données de l'essai variété de Séfa en 2013 a montré une certaine performance dans le calage du nombre de talles produit par mètre carré. Le nombre maximal de talles est correctement simulé (181 talles simulés contre 185 observés) mais il est atteint à 48 jours après semis (JAS) c'est-à-dire 5 jours plus tard que ce qui est observé dans nos conditions d'essai. Ce délai de 5 jours est pratiquement le même entre la date de début de tallage du modèle et celui observé sur les essais. En effet, en conditions d'essai, le tallage a débuté à 19 JAS mais il est déclenché dans le modèle aux environs de 25 JAS. Avant 43 JAS, le modèle sous-estime (entre 17 et 35 talles par mètre

carré) le nombre de talles produits mais il donne de très bonnes estimations après cette date (Figure 21).

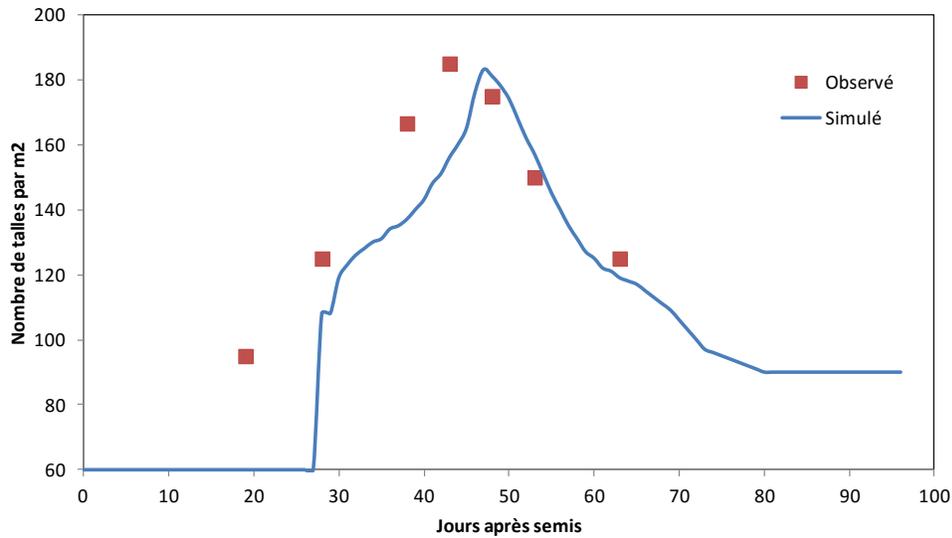


Figure 21 : Résultats du calage du nombre de talles par mètre carré avec la prise en compte d'éventuels stress

3.3.5 Validation du modèle

La validation du calage du modèle a été effectuée avec les données provenant des essais conduits pendant l'année 2012 à Kolda, Séfa et Sinthiou Malème et pendant l'année 2013 sur un autre essai conduit à Séfa (dénommé « essai biomasse ») car ces essais avaient connu de relatives bonnes conditions pluviométriques (*cf* Chapitre 2). Le calage a uniquement été dirigé sur le rendement grains car les données de phénologie et de nombre de talles n'avaient pas été collectées lors de la première année d'essai (2012) avec grande précision. Les valeurs de RRMSE et de IA obtenues pour le rendement grains étaient respectivement de 42% et 0,99 indiquant une validation acceptable sur les données utilisées (Figure 22).

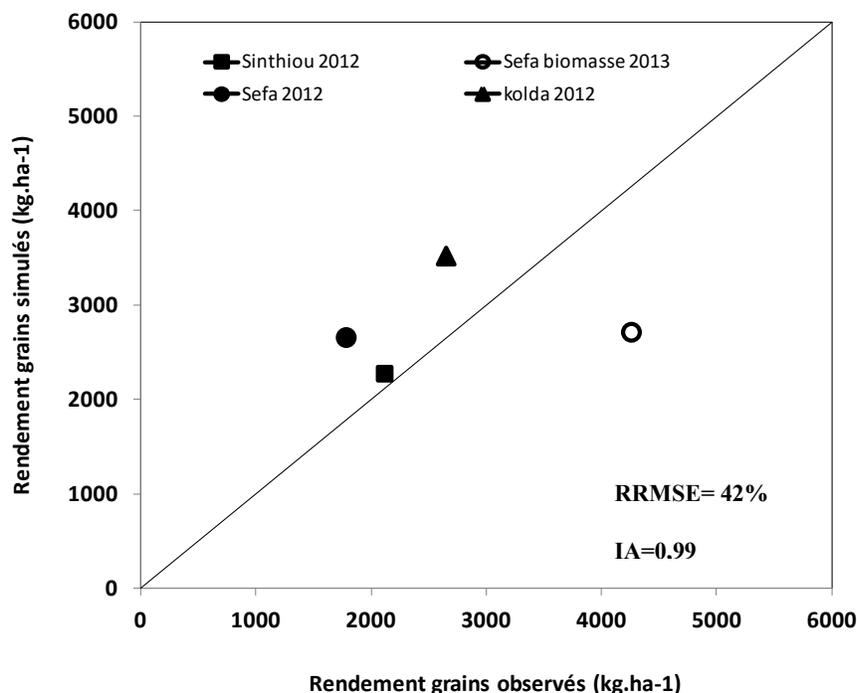


Figure 22 : Résultats de la validation du modèle sur le rendement grains obtenus à partir des essais conduits en 2012 à Séfa, Kolda et Sinthiou Malème et en 2013 à Séfa (essai « biomasse »).

3.4 Discussion

La simulation du fonctionnement du riz pluvial dans les conditions de culture du Sénégal a été effectuée premièrement par un calage satisfaisant de la date de floraison après ajustement de quelques jours par rapport à la date d'épiaison. Le calage a été effectué pour une variété de riz de cycle de 75-85 jours et une autre de 95-100 jours. Le processus de calibration s'est poursuivi par une analyse préalable du modèle CERES-Rice pour appréhender sa capacité à être sensible aux aléas de fertilité du sol et de bilan hydrique. Ce test a mis en évidence que le modèle était paramétré pour fonctionner dans des conditions d'alimentation hydrominérale quasi optimale. En effet, au niveau du statut hydrique du sol, le modèle n'applique l'effet du déficit hydrique sur le fonctionnement de la plante que lorsque 80% au moins de la réserve utile du sol a été consommée. Cela mettrait en évidence un dysfonctionnement dans le modèle CERES-Rice puisque le riz et surtout le riz pluvial est la céréale sèche la plus sensible au déficit hydrique, bien plus que le maïs, le sorgho et le mil (Dancette, 1983 ; Chopart, 1980) et qu'il ne supporterait pas un tel niveau de stress hydrique. En effet, les céréales les plus résistantes souffrent de l'effet d'un stress hydrique lorsqu'en moyenne 50% de la réserve utile est entamée. Par ailleurs, le

fonctionnement des autres versions de CERES (CERES-Maize, CERES-Sorghum et CERES-Millet) prend effectivement en compte l'effet du stock hydrique du sol sur la réponse en biomasse ou grains des plantes pour lesquelles ils ont été paramétrés (Birch *et al.*, 1990 ; Plantureux *et al.*, 1991 ; Kouakou, 2013). L'on pourrait être porté à croire que le paramétrage actuel de CERES-Rice serait plus adapté au riz irrigué conduit en conditions agronomiques optimales. Une situation similaire prévalait au niveau de CERES-Millet de la version DSSAT 4.5 où la réponse du mil à la fertilisation azotée était paramétrée comme si le matériel végétal était du maïs (Kouakou, 2013).

La très faible prise en compte du stress hydrique et de la déficience du sol en nutriments n'aurait pas été remarquée à travers des travaux antérieurs peut-être parce que la plupart de ceux-ci ont été conduits en conditions optimales et dans des environnements de culture frais et arrosés (Cheyglinted *et al.*, 2001 ; Vilayvong *et al.*, 2012 ; Vilayvong *et al.*, 2015 ; Gerardeaux *et al.*, 2012) où la ressource hydrique ne s'est pas montrée limitante. L'équipe DSSAT a été informée de ces dysfonctionnements majeurs de CERES-Rice afin que ces anomalies soient corrigées dans les versions ultérieures.

La calibration du rendement grains pour la variété à cycle court n'a pu se poursuivre car la conversion de l'énergie reçue en assimilats est limitée dans le modèle dès que le cycle de la variété se raccourcit. Il faudrait en effet des paramètres génétiques plus élevés que la moyenne des valeurs prises par les variétés irriguées pour espérer approcher le potentiel de production de la variété à cycle court alors que les essais sont sensés ne pas souffrir de contrainte hydrique ni en nutriments et que le poids des grains est à sa valeur potentielle. Il est prévu en effet une moyenne de 55 pour le paramètre G1 et pour ce coefficient génétique, les valeurs prises par les variétés de riz irriguées dépassent rarement le seuil de 80 (Hoogenboom *et al.*, 2015). Il est donc difficilement acceptable qu'en riziculture pluviale G1 soit supérieure à 80. Or c'est avec de telles valeurs de G1 que l'on peut espérer avoir des rendements supérieurs à 3 t.ha⁻¹. Il apparaît alors irréaliste de pouvoir caler la production de biomasse pour une variété à cycle moyen de 75-85 jours dans les conditions de nos essais. L'on est alors amené à s'interroger si une durée de cycle de moins de 90 jours est autorisée dans le modèle. En effet, selon la classification admise, les

variétés de riz dites précoces ont des durées de cycle situées entre 90-100 jours (APRAO, 2011). Notre « variété précoce » serait peut-être trop précoce.

Le calibrage tant du rendement grains que du nombre de talles a été satisfaisant sur la variété à cycle plus long. Cet élément conforte encore l'hypothèse selon laquelle le modèle CERES-Rice serait plus adapté au riz irrigué car la durée du cycle du riz irrigué est en général plus longue que celle du riz pluvial.

3.5 Conclusion

Le calibrage du modèle CERES-Rice a été satisfaisant pour la date de mise à fleur des variétés de riz mais quelques contraintes liées à l'algorithme interne du modèle n'ont pas rendu possible le calage du modèle sur tous les types d'essais pour les paramètres portant sur les biomasses et le rendement grains. Ces contraintes internes portent sur une difficile prise en compte par le modèle de l'effet du stress hydrique et du coefficient SLPF lié à la fertilité du sol sur la réponse des plantes. En définitive, seules les données des essais ayant le moins souffert de conditions climatiques sèches ont été utilisées pour caler et valider CERES-Rice sur le tallage et le rendement grains. CERES-Rice ne peut donc pas, dans sa version actuelle, être utilisée pour effectuer des analyses de risques climatiques puisque le déficit hydrique est la contrainte majeure dans les zones étudiées. Néanmoins, un essai d'analyse de risques climatiques en riziculture pluviale au Sénégal sera effectué au chapitre suivant par l'étude de l'effet de la date de semis sur les performances agronomiques de quatre variétés de riz pluvial NERICA de plateau en zone soudano-sahélienne.

Chapitre 4 : Essai d'analyse de risques climatiques par l'étude de l'effet de la date de semis sur le comportement de quatre variétés de riz pluvial à haut rendement grains pendant deux années de culture contrastées en zone soudano-sahélienne au Sénégal

4.1 Introduction

Le Sénégal, comme la plupart des pays du Sahel ouest-africain, fait face à une situation alimentaire relativement difficile. En effet, l'écart entre la production nationale et les besoins croissants de la population n'a pas cessé de se creuser au fil des années (Dieng *et al.*, 2011). Dans les années 2000, la croissance de la consommation de riz en Afrique de l'Ouest était estimée à 6% par an, ce qui représentait le triple de la croissance de la production rizicole dans cette partie du monde. La consommation du riz a particulièrement pris de l'ampleur et s'est généralisée au fil des années faisant de cette denrée, un aliment stratégique duquel dépend la sécurité alimentaire des ménages vulnérables. Particulièrement, au Sénégal, le poids du riz passe d'environ 20% pour les ménages en situation de sécurité alimentaire à plus de 40% de la consommation alimentaire globale pour les ménages en insécurité alimentaire sévère (PAM, 2011). Compte tenu de cette place prépondérante dans la consommation alimentaire des ménages les plus vulnérables, un choc sur le prix du riz induit nécessairement des effets néfastes sur le bien-être des consommateurs et déstabilise l'équilibre social. Les émeutes de la faim de 2008 consécutives à la flambée des prix du riz sur le marché international en est une preuve édifiante (CSAO, 2011 ; PAM, 2011 ; Seck *et al.*, 2013). Par ailleurs de récentes études ont montré qu'une augmentation de 30% du prix du riz au détail dans certains pays ouest-africains pouvait faire progresser le taux de pauvreté de la population de 64% à 70% (PAM, 2011). Même si actuellement les productions nationales demeurent inférieures à la demande, des programmes de développement de la riziculture ont toujours été appliqués dans les pays africains. Magne (1975) signale qu'à partir de 1967, plusieurs actions ont été entreprises au Sénégal pour développer la riziculture pluviale par l'extension des surfaces cultivées. Pour résoudre la problématique de la faible productivité des riz africains, des variétés de riz d'origine asiatique, à haut rendement, ont été introduites dans les rizières africaines depuis les années 60. La difficile adaptation de ces variétés introduites aux

contraintes des rizières africaines a contribué à modifier les axes de recherche dans le sens de la création de variétés combinant à la fois les caractères de productivité des riz asiatiques et de rusticité des riz africains (Volvey *et al.*, 2005). Depuis les années 90, avec la mise au point des NERICAs et leur diffusion dans les zones rizicoles africaines, les productions nationales annuelles de riz ont connu des augmentations régulières (ADRAO, 2002 ; ADRAO, 2006 ; Seck *et al.*, 2013). Il convient néanmoins de pérenniser cette dynamique par l'ajustement des décisions et techniques de culture face aux différents risques climatiques des milieux de culture du riz. En Afrique subsaharienne, les risques climatiques majeurs constamment identifiés se rapportent à la date de début de la saison des pluies, la date de fin de la saison des pluies, à la durée de la saison culturale, aux séquences sèches au cours de la saison humide (Balme *et al.*, 2005 ; Sarr *et al.*, 2011 ; Alhassane *et al.*, 2013 ; Kouakou *et al.*, 2016 ; Sagna *et al.*, 2015). Ces risques sont exacerbés en riziculture pluviale puisque les plants de riz, dans ces conditions, ne dépendent essentiellement que de l'eau de pluie pour leur alimentation hydrique. La mise en culture de variétés de riz à cycle court s'avère être l'une des options pour minimiser ces risques à condition qu'elles soient semées au moment où les pluies sont réellement installées. Les paysans de la zone sahélienne et du Sénégal en particulier ont l'habitude de procéder à plusieurs semis pour s'assurer qu'au moins une des dates leur garantirait des rendements satisfaisants (Balme *et al.*, 2005). Face à cette problématique, les variétés de riz NERICA, vu leur précocité, se présentent comme un matériel végétal adéquat. Le présent travail étudie l'effet de la date de semis sur les performances agronomiques de quatre variétés de riz pluvial NERICA de plateau à cycles contrastés en zone soudano-sahélienne au Sénégal.

4.2 Matériels et méthode

4.2.1 Site expérimental

Les essais ont été conduits sur la station de recherche de l'Institut Sénégalais de Recherches Agricoles de Sinthiou Malème (13°50'Nord et 13°55'Ouest, 22 m). Le site de Sinthiou Malème est situé en zone soudano-sahélienne, entre les isohyètes 600 mm et 700 mm (Salack *et al.*, 2011 ; Sié, 1997). Le climat de cette zone est caractérisé par un régime pluviométrique monomodal avec deux saisons bien contrastées. Les premières pluies sont enregistrées à partir de fin mai et la saison pluvieuse prend fin en général au cours du mois d'octobre. Cependant, seuls

trois mois sont réellement humides : juillet, août et septembre. Les sols de la station de Sinthiou Malème sont sablo-argileux avec un pH acide (4,95). Ils contiennent une faible teneur en matière organique et ont une faible capacité d'échange cationique. Ce sont donc des sols pauvres ayant un faible pouvoir de rétention hydrique. Les pentes des parcelles sont faibles laissant croire un relief plat. La végétation naturelle de la zone est dominée par un tapis herbacé abondant en saison des pluies composé en majorité de graminées, mais aussi de cypéracées et de dicotylédones.

4.2.2 Matériel végétal

Le matériel végétal était constitué par les quatre variétés de riz pluvial de plateau de type NERICA (« Nouveau Riz pour l'Afrique ») tels que décrits au chapitre 3.

4.2.3 Conduite des essais

Deux essais ont été semés, pendant la saison des pluies, à des dates décalées en 2013 et répétés en 2014. Tous ces essais ont été conduits en condition d'alimentation hydrique strictement pluviale. L'objectif initial était d'effectuer le premier semis dès l'installation de la saison des pluies, en début du mois de juillet et de semer le deuxième essai au plus tard trois semaines après le premier de sorte que toutes les variétés étudiées bouclent leurs cycles avant la fin de la saison pluvieuse. Cependant, dans la pratique, le semis du premier essai de 2013 a été effectué le 22 juillet, après deux journées consécutives de pluie d'une hauteur totale de 41 mm. Le semis du deuxième essai a eu lieu le 5 août, 3 jours après une pluie de 17 mm. En 2014, le premier essai a été semé le 24 juillet, 5 jours après une pluie de 25 mm. Le second essai de 2014 a été installé le 8 août, 3 jours après une pluie de 61 mm. Le dispositif en blocs de Fisher complètement randomisé a été retenu pour l'installation des essais. Les sites expérimentaux avaient reçu une culture d'arachide pendant l'hivernage précédant la mise en place des essais. Les essais comportaient trois répétitions en 2013 et quatre en 2014. Les parcelles élémentaires avaient une superficie de 30 m² (6 m x 5 m) et de 16 m² (4 m x 4 m) respectivement en 2013 et en 2014. Pour chacun des quatre essais, les travaux de préparation de terrain ont consisté en un labour aux disques suivi d'un hersage. La conduite agronomique des différents essais a été celle préconisée par la recherche agronomique au Sénégal telle que décrite aux chapitres 2 et 3.

4.2.4 Données climatiques

Une station météorologique automatique CIMEL ENERCO 405 (© Cimel Electronique S.A.S France) a été installée le 13 juillet 2013 sur le site des essais pour l'enregistrement des données climatiques journalières suivantes : températures minimales et maximales, humidités relatives minimales, maximales et moyennes, radiations globales, vitesses moyennes du vent et hauteurs de pluie. Cependant, seules les données se rapportant aux températures et à la pluviométrie seront exploitées dans le cadre de ce travail. Du fait de l'installation de la station météorologique après le début des pluies de l'année 2013, les premières données climatiques de cette même année n'ont pu être enregistrées. Les données pluviométriques ont été néanmoins complétées grâce aux valeurs enregistrées à partir d'un pluviomètre à lecture directe installé sur le même site depuis le mois de mai 2013. Le début, la durée et la fin de la saison des pluies ont été déterminés suivant les critères de référence développés par Sivakumar (1988) et adoptés par les auteurs ayant travaillé sur les caractéristiques de la saison des pluies dans des zones soumises à un climat soudano-sahélien (Sarr *et al.*, 2011 ; Salack *et al.*, 2011 ; Salack *et al.*, 2013). Ces critères ont été détaillés au chapitre 2 du présent document. L'étude a aussi porté sur les périodes de déficit hydrique correspondant aux jours, pendant la saison pluvieuse, au cours desquels la pluviosité journalière n'atteint pas 5 mm (Sivakumar, 1988 ; Peugeot, 1995 ; Balme *et al.*, 2005). Ainsi, une pluviométrie pentadaire est considérée déficitaire lorsque la hauteur de pluie enregistrée sur la pentade est inférieure à 25 mm.

4.2.5 Paramètres agronomiques mesurés et calculés

L'étude a porté sur la durée de cycle, la hauteur, la production de biomasse végétative ainsi que le rendement grains et les composantes du rendement tels que largement décrits au chapitre 2.

4.2.6 Traitement et analyse de données

Les analyses statistiques ont été effectuées à l'aide du logiciel R version 3.0.2 (R Core Team, 2013) sur toutes les variables excepté celles se rapportant à la phénologie (DSF et DSM). Le test de Shapiro-Wilk (Shapiro and Wilk, 1965) a permis de vérifier la distribution normale des données et le test de Bartlett (Bartlett, 1937) a été utilisé pour tester l'égalité des variances. Les analyses de variances ont été effectuées au seuil de significativité de 5%. En cas de différence

significative, les comparaisons multiples de moyennes ont été réalisées grâce au test de Tukey (Tukey, 1949).

4.3 Résultats

4.3.1 Données climatiques

En 2013, la température maximale journalière a oscillé entre 29 °C et 35 °C depuis le semis du premier essai jusqu'au 11 septembre (le premier essai était à 51 JAS et le second était à 37 JAS). La température maximale a ensuite varié autour de 35 °C jusqu'à la fin des essais. La température minimale journalière a été plus stable et est généralement restée dans l'intervalle 20 °C - 25 °C sauf à partir du 3 novembre (90 JAS au niveau deuxième essai) où des valeurs comprises entre 15 °C et 20 °C ont été enregistrées. Les températures de 2014 ont évolué dans les mêmes intervalles que celles de 2013 mais à partir du 22 septembre (60 JAS et 45 JAS respectivement pour les essais 1 et 2) les températures maximales journalières ont régulièrement pris des valeurs comprises entre 35°C et 40°C (Figure 23). En 2013, la saison des pluies a débuté le 3 juillet et l'on a enregistré une pluviosité annuelle de 738 mm. Pendant cette même année, le premier essai a reçu 573 mm de pluie et le deuxième en a reçu 536 mm. Il a été dénombré 46 et 44 jours de pluie respectivement pour le premier et le deuxième essai. La répartition pentadaire de la pluviométrie a mis en évidence des périodes de déficit hydrique intra-saisonnier d'une durée cumulée de cinq pentades. Une sécheresse de fin de cycle a été observée à partir du 21 septembre après sept pentades consécutives humides. La sécheresse de fin de cycle est survenue alors que le premier essai était à 60 JAS et le deuxième à 46 JAS. La saison des pluies a pris fin le 21 octobre, le premier essai était à alors à 91 JAS et le deuxième, à 77 JAS. En 2014, la saison des pluies a commencé le 29 juin et l'on a enregistré une pluviosité annuelle de 693,5 mm. Le premier essai de l'année 2014 a reçu 461 mm de pluie pendant 33 jours et le second en a reçu 377 mm pendant 31 jours. Les périodes de déficit hydrique au cours du cycle ont eu une durée cumulée de 8 pentades et la sécheresse de fin de cycle a été enregistrée à partir du 26 septembre après seulement trois pentades humides. Cette sécheresse de fin de cycle est survenue alors que les premier et deuxième essais étaient respectivement à 64 et 49 JAS. La saison des pluies a pris fin le 20 octobre soit à 88 JAS pour le premier essai et à 73 JAS pour le deuxième essai (Figure

23). En définitive, la saison des pluies a eu une durée de 110 jours en 2013 et de 113 jours en 2014.

4.3.2 Durée de cycle

Sur les deux années d'essais, les cycles des variétés n'ont pas été modifiés par la date de semis. En 2013, la floraison de NERICA 1 a eu lieu à 1040-1041 °C.j et celle de NERICA 4 est survenue à 1055-1056 °C.j. Les variétés à cycle plus court ont fleuri à 906-911 °C.j (NERICA 8) et à 925-926 °C.j (NERICA 11). La durée de cycle semis-maturité correspondait à un temps thermique de 1471-1488 °C.j (NERICA 1), 1500-1504 °C.j (NERICA 4), 1379-1399 °C.j (NERICA 8) et 1393-1416 °C.j (NERICA 11). En 2014, les durées de cycle semis-floraison étaient de 1036-1049 °C.j pour NERICA 1 et NERICA 4 et de 911-926 °C.j pour NERICA 8 et NERICA 11. Les durées de cycle semis-maturité étaient de 1460-1485 °C.j pour NERICA 1 et NERICA 4 et de 1339-1347 °C.j pour NERICA 8 et NERICA 11.

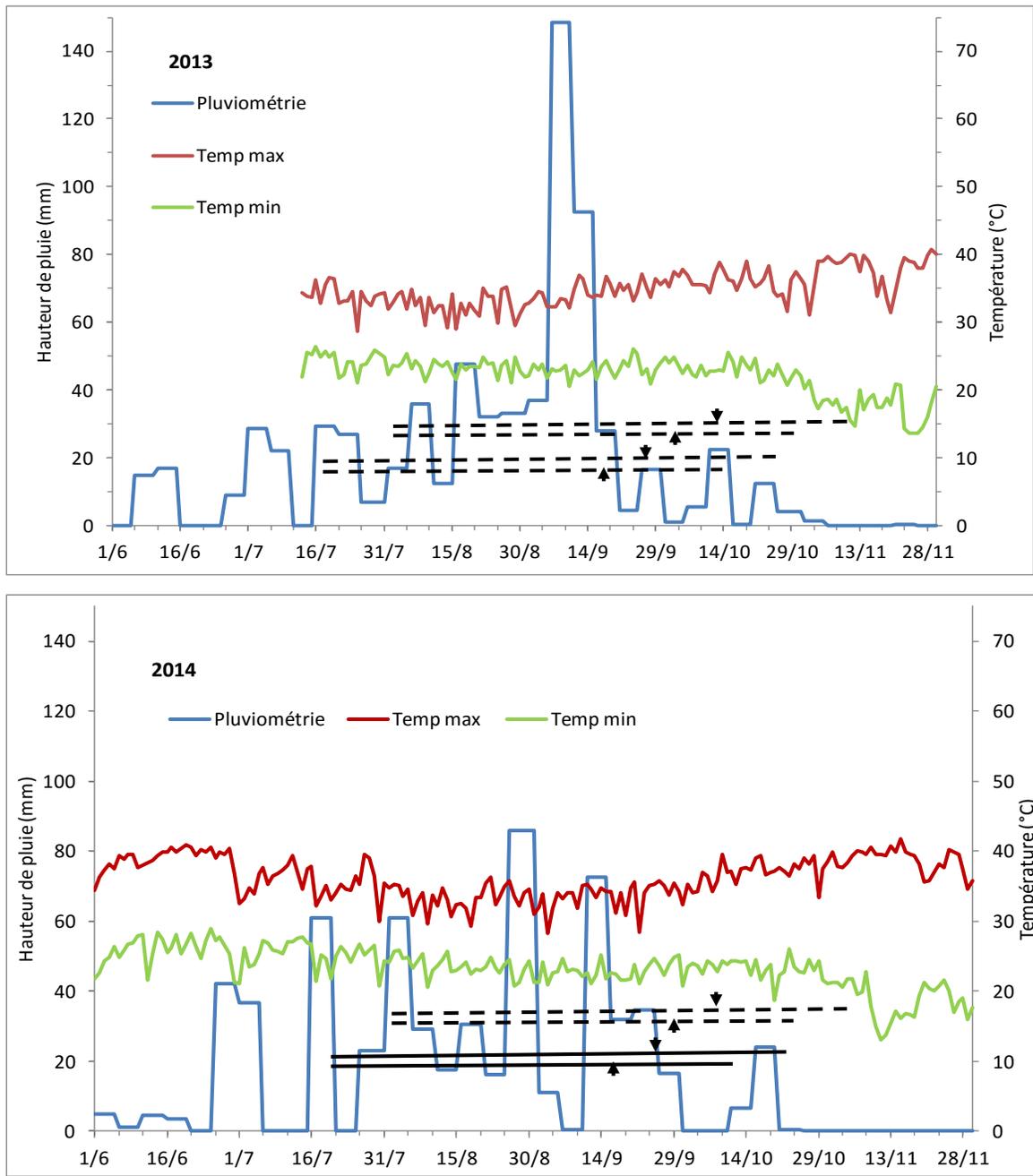


Figure 23 : Températures maximales et minimales journalières et pluviométrie pentadaire enregistrées au cours des essais en 2013 et en 2014 avec positionnement des longueurs de cycle et de dates de floraison des variétés de riz. *Les traits continus correspondent aux longueurs de cycle de la première date de semis et les traits discontinus correspondent aux longueurs de cycle de la deuxième date de semis. Les flèches matérialisent les périodes de floraison.*

4.3.3 Hauteur des plants à la récolte

La date de semis a eu un effet significatif sur la hauteur des plants à la récolte en 2013. Les plants avaient une hauteur moyenne de 92 cm avec le premier essai contre 82 cm avec le deuxième essai (Tableau XIV). Même si les plants étaient plus courts avec la deuxième date de semis en 2014, cette différence de hauteur par rapport à la première date n'était pas significative (Tableau XV). Aucun effet variétal ni longueur de cycle n'a été observé sur les hauteurs des plants pendant ces deux années d'essais.

4.3.4 Rendement et indice de récolte

4.3.4.1 Rendement

Le rendement grains a significativement baissé de la première date à la deuxième date de semis sur les deux années. Cette baisse de rendement était de 75% (de 1792 kg.ha⁻¹ à 439 kg.ha⁻¹) en 2013 et de 79% (de 1047 kg.ha⁻¹ à 220 kg.ha⁻¹) en 2014 (Tableaux XIV et XV). Aucune différence significative n'a été observée entre les rendements grains des quatre variétés sur les deux années. Les variétés à cycle court avaient cependant un rendement grains supérieur à celui des variétés tardives en 2013. Au niveau du rendement paille, aucun effet date de semis ni variété ni longueur de cycle n'a été noté sur les deux années d'essais. Ce rendement paille était en moyenne de 2 605 kg.ha⁻¹ en 2013 et de 5 336 kg.ha⁻¹ en 2014 (Tableaux XIV et XV).

4.3.4.2 Indice de récolte

Une différence significative a été notée au niveau de l'indice de récolte des dates de semis sur les deux années. Cet indice est passé de 0,39 à 0,15 en 2013 et de 0,16 à 0,04 en 2014 (Tableaux XIV et XV). L'indice de récolte de la deuxième date de semis a donc connu une baisse de 63% et de 75% par rapport à la première date de semis respectivement en 2013 et en 2014. Par ailleurs, une différence significative a été observée entre les indices de récolte des variétés en 2013. Avec IR=0,36, NERICA 11 avait le meilleur indice de récolte suivis de NERICA 8 (0,29) et de NERICA 4 (0,23). NERICA 1 avait le plus petit indice de récolte, 0,19 (Tableau XIV). Sur les deux années expérimentales, l'indice de récolte des variétés précoces étaient supérieur à celui des variétés tardives (Tableaux XIV et XV).

4.3.5 Composantes du rendement

4.3.5.1 Nombre de talles

En 2013, la date de semis et le cycle des variétés n'ont pas eu d'effet significatif sur le nombre de talles produit par unité de surface. En 2014, le nombre de talles a diminué de 22 % de la première à la deuxième date de semis en passant de 162 talles.m⁻² à 127 talles.m⁻² sans toutefois varier en fonction du cycle des variétés étudiées. Sur les deux années, il a été noté une différence significative entre les talles produites par les variétés de riz. Ainsi, en 2013, NERICA 1 a produit le plus de talles (175 talles.m⁻²) suivi des trois autres variétés qui avaient un nombre similaire de talles (145 talles.m⁻² en moyenne) (Tableau XIV). En 2014, NERICA 1 et NERICA 8 avaient produit en moyenne 157 talles.m⁻² contre 131 talles.m⁻² pour NERICA 11 et NERICA 4 (Tableaux XIV et XV).

4.3.5.2 Nombre de panicules

Le nombre de panicules produites a significativement baissé de la première date à la deuxième date de semis sur les deux années. Cette baisse était de 18% (de 132 panicules.m⁻² à 108 panicules.m⁻²) en 2013 et de 26% (de 135 panicules.m⁻² à 97 panicules.m⁻²) en 2014. Sur les deux années d'essais, le nombre de panicules produites ne différaient pas statistiquement entre les variétés prises individuellement ou regroupées par cycle (Tableaux XIV et XV).

4.3.5.3 Taux de talles infertiles

En 2013, le taux de talles infertiles a significativement augmenté de la première à la deuxième date de semis en passant de 10% à 31% (Tableau XIV). Par contre en 2014, la date de semis n'a pas eu d'effet significatif sur le taux de talles infertiles. Cependant un effet variétal a été noté sur ce taux pendant les deux années d'essais. En effet, NERICA 1 avait le taux le plus élevé (30% en moyenne sur les deux années), NERICA 4 (18% en moyenne sur les deux années) et NERICA 8 (16% en moyenne sur les deux années) avaient des taux intermédiaires et NERICA 11 avait le plus faible taux de talles stériles (13% en moyenne sur les deux années). Ce taux était plus élevé chez les variétés à cycle plus long en 2013 mais en 2014, il était statistiquement similaire quelle que soit la longueur de cycle des variétés de riz (Tableaux XIV et XV).

4.3.5.4 Nombre d'épillets par panicule

La date de semis a eu un effet significatif sur le nombre d'épillets produits par panicule en 2014. Le nombre d'épillets par panicule a baissé de 30% en passant de 108 à 76 de la première à la deuxième date de semis (Tableau XV). La date de semis n'a eu aucun effet significatif sur le nombre d'épillets par panicule en 2013. Par contre en 2013, il a été noté un effet variétal sur ce paramètre. Il était en moyenne de 174, 120, 85 et 72 épillets par panicule respectivement pour NERICA 8, NERICA 11, NERICA 1 et NERICA 4 (Tableau XIV). En 2014, aucun effet variétal n'a été noté pour le nombre d'épillets par panicule. Les variétés plus précoces avaient produit plus d'épillets que les plus tardives lors des essais de 2013 cependant aucune différence statistique n'a été observée entre le nombre d'épillets produit en 2014 entre variétés précoces et variétés tardives (Tableaux XIV et XV).

4.3.5.5 Taux de stérilité

Le taux de stérilité a significativement augmenté de la première à la deuxième date de semis sur les deux années. Cette augmentation du taux de stérilité était de 76% (de 34% à 60%) en 2013 et de 31% (de 68% à 90%) en 2014 (Tableaux XIV et XV). Une différence significative a été notée entre les taux de stérilité des variétés en 2014. Ce taux était de 86% pour NERICA 1 et NERICA 4 et de 73% et 71% respectivement pour NERICA 8 et NERICA 11. Aucune différence statistique n'a été observée sur les taux de stérilité des variétés de riz en 2013. En 2013, le taux de stérilité des variétés ne dépendait pas de la longueur de leur cycle mais en 2014, les variétés à cycle plus long ont enregistré un taux de stérilité supérieur à celui des variétés précoces (Tableaux XIV et XV).

4.3.5.6 Poids de mille grains

Aucun effet date de semis ni variété ni longueur de cycle n'a été noté sur le poids de mille grains sur les deux années d'essais. Le poids de mille grains était en moyenne de 24 g en 2013 et de 21 g en 2014 (Tableaux XIV et XV).

Tableau XIV : Valeurs moyennes des paramètres mesurés en 2013 suivant la date de semis, la variété, le cycle des variétés de riz et l'interaction entre la date de semis et les autres facteurs

| | HAUT | TAL | PANI | INFERT | RDTG | RDTP | IR | EPIL | STERIL | PMG |
|--|------|--------|-------|---------|---------|--------|----------|--------|----------|--------|
| <i>Date de semis</i> | | | | | | | | | | |
| Date 1 | 92 a | 147 a | 132 a | 10,2 b | 1792 a | 2764 a | 0,39 a | 118 a | 34 b | 23,8 a |
| Date 2 | 82 b | 159 a | 108 b | 31,5 a | 439 b | 2445 a | 0,15 b | 108 a | 60 a | 24,4 a |
| <i>Variété</i> | | | | | | | | | | |
| NERICA 1 | 81 a | 175 a | 117 a | 31,4 a | 775 a | 2603 a | 0,19 c | 85 b | 61,5 a | 23,8 a |
| NERICA 4 | 87 a | 145 b | 109 a | 26,1 ab | 1065 a | 2968 a | 0,23 bc | 72 b | 44,8 a | 24,1 a |
| NERICA 8 | 91 a | 148 b | 126 a | 14,3 bc | 1157 a | 2387 a | 0,29 ab | 174 a | 39,9 a | 24,0 a |
| NERICA 11 | 88 a | 144 b | 127 a | 11,7 c | 1466 a | 2461 a | 0,36 a | 120 ab | 41,9 a | 24,4 a |
| <i>Longueur de cycle</i> | | | | | | | | | | |
| Long | 84 a | 160 a | 113 a | 28,7 a | 920 b | 2785 a | 0,21 b | 79 b | 53,1 a | 23,9 a |
| Court | 90 a | 146 a | 127 a | 13 b | 1311 a | 2424 a | 0,33 a | 147 a | 40,9 a | 24,2 a |
| <i>Date de semis x Variété</i> | | | | | | | | | | |
| Date 1 - NERICA 1 | 82 a | 154 ab | 130 a | 15,5 c | 1425 ab | 3101 a | 0,31 abc | 93 ab | 34,9 bc | 23,1 a |
| Date 1 - NERICA 4 | 91 a | 150 ab | 133 a | 11,9 c | 1874 a | 3012 a | 0,38 ab | 81 b | 16,0 c | 23,9 a |
| Date 1 - NERICA 8 | 99 a | 143 ab | 134 a | 6,4 c | 1906 a | 2551 a | 0,42 ab | 133 ab | 37,0 bc | 24,0 a |
| Date 1 - NERICA 11 | 94 a | 140 b | 130 a | 7,1 c | 1962 a | 2393 a | 0,45 a | 165 ab | 48,3 abc | 23,9 a |
| Date 2 - NERICA 1 | 79 a | 196 a | 103 a | 47,2 a | 124 c | 2104 a | 0,07 d | 78 b | 88,1 a | 24,4 a |
| Date 2 - NERICA 4 | 83 a | 139 b | 85 a | 40,2 ab | 256 c | 2924 a | 0,07 d | 64 b | 73,5 ab | 24,3 a |
| Date 2 - NERICA 8 | 83 a | 152 ab | 119 a | 22,3 bc | 408 bc | 2222 a | 0,16 cd | 214 a | 42,8 abc | 24,0 a |
| Date 2 - NERICA 11 | 82 a | 148 ab | 124 a | 16,2 bc | 969 abc | 2530 a | 0,28 bc | 76 b | 35,5 bc | 24,8 a |
| <i>Date de semis x longueur de cycle</i> | | | | | | | | | | |
| Date 1 - Long | 87 a | 152 a | 132 a | 13,7 b | 1649 a | 3057 a | 0,35 b | 87 a | 25,4 b | 23,5 a |
| Date 1 - Court | 97 a | 142 a | 132 a | 6,8 b | 1934 a | 2472 a | 0,43 a | 149 a | 42,7 b | 24,0 a |
| Date 2 - Long | 81 b | 168 a | 94 a | 43,7 a | 190 b | 2514 a | 0,07 c | 71 a | 80,8 a | 24,3 a |
| Date 2 - Court | 82 b | 150 a | 121 a | 19,2 b | 689 b | 2376 a | 0,22 b | 145 a | 39,2 b | 24,4 a |

Au niveau de chaque facteur, les moyennes en colonne affectées de la même lettre ne diffèrent pas significativement au seuil de 5%

Tableau XV : Valeurs moyennes des paramètres mesurés en 2014 suivant la date de semis, la variété, le cycle des variétés de riz et l'interaction entre la date de semis et les autres facteurs

| | HAUT | TAL | PANI | INFERT | RDTG | RDTP | IR | EPIL | STERIL | PMG |
|--|------|--------|---------|----------|---------|--------|----------|-------|---------|--------|
| <i>Date de semis</i> | | | | | | | | | | |
| Date 1 | 72 a | 162 a | 134,5 a | 16,35 a | 1047 a | 5558 a | 0,16 a | 108 a | 68 b | 20 a |
| Date 2 | 67 a | 126 b | 99,6 b | 20,17 a | 220 b | 5113 a | 0,04 b | 76 b | 90 a | 21 a |
| <i>Variété</i> | | | | | | | | | | |
| NERICA 1 | 68 a | 157 a | 109,5 a | 30,04 a | 642 a | 5584 a | 0,09 a | 87 a | 86 a | 22 a |
| NERICA 4 | 68 a | 130 b | 116,9 a | 10,94 b | 544 a | 5889 a | 0,08 a | 85 a | 86 a | 19 a |
| NERICA 8 | 72 a | 158 a | 128,0 a | 17,94 b | 683 a | 4572 a | 0,12 a | 92 a | 73 b | 20 a |
| NERICA 11 | 71 a | 133 b | 113,9 a | 14,13 b | 665 a | 5298 a | 0,10 a | 103 a | 71 b | 19 a |
| <i>Longueur de cycle</i> | | | | | | | | | | |
| Long | 68 a | 144 a | 113 a | 20,5 a | 593 a | 5736 a | 0,08 b | 86 a | 86 a | 21 a |
| Court | 71 a | 145 a | 121 a | 16,0 a | 674 a | 4935 a | 0,11 a | 98 a | 72 b | 19 a |
| <i>Date de semis x Variété</i> | | | | | | | | | | |
| Date 1 - NERICA 1 | 70 a | 169 ab | 113 bc | 33,2 a | 1159 a | 5821 a | 0,16 a | 90 a | 78,5 a | 21,7 a |
| Date 1 - NERICA 4 | 68 a | 164 ab | 150 a | 8,4 cd | 945 abc | 6104 a | 0,13 abc | 100 a | 74,2 a | 18,1 a |
| Date 1 - NERICA 8 | 77 a | 183 a | 145 a | 20,5 abc | 1112 ab | 4446 a | 0,20 a | 118 a | 59,9 a | 21,6 a |
| Date 1 - NERICA 11 | 74 a | 134 b | 130 ab | 3,4 d | 971 abc | 5863 a | 0,14 ab | 125 a | 60,8 ab | 16,9 a |
| Date 2 - NERICA 1 | 66 a | 146 ab | 106 bc | 26,9 ab | 124 d | 5346 a | 0,02 d | 85 a | 93,0 ab | 22,2 a |
| Date 2 - NERICA 4 | 67 a | 97 c | 84 c | 13,5 bcd | 144 d | 5674 a | 0,03 d | 69 a | 97,6 ab | 20,6 a |
| Date 2 - NERICA 8 | 66 a | 133 b | 111 bc | 15,4 bcd | 255 cd | 4698 a | 0,05 cd | 67 a | 86,9 b | 17,7 a |
| Date 2 - NERICA 11 | 67 a | 132 b | 98 c | 24,9 ab | 358 bcd | 4734 a | 0,07 bcd | 82 a | 81,6 b | 21,7 a |
| <i>Date de semis x longueur de cycle</i> | | | | | | | | | | |
| Date 1 - Long | 69 a | 166 a | 132 a | 20,8 a | 1052 a | 5963 a | 0,15 a | 95 ab | 76 b | 20 a |
| Date 1 - Court | 75 a | 158 a | 137 a | 11,9 a | 1041 a | 5154 a | 0,17 a | 121 a | 60 c | 19 a |
| Date 2 - Long | 67 a | 121 a | 95 b | 20,2 a | 134 b | 5510 a | 0,02 b | 77 b | 95 a | 21 a |
| Date 2 - Court | 67 a | 132 a | 105 b | 20,2 a | 306 b | 4716 a | 0,06 b | 74 b | 84 ab | 20 a |

Au niveau de chaque facteur, les moyennes en colonne affectées de la même lettre ne diffèrent pas significativement au seuil de 5%.

4.4 Discussion

Les expérimentations ont été conduites sur la même période de la saison pluvieuse puisque sur les deux années, les premiers semis ont été effectués pendant la cinquième pentade du mois de juillet et les seconds pendant la deuxième pentade du mois d'août. Sur les deux années, la fin de la saison pluvieuse n'a pas varié et elle a été observée pendant la cinquième pentade du mois d'octobre. Cette caractéristique de la fin de la saison des pluies a été mise en évidence lors d'autres travaux portant sur la zone soudano-sahélienne (Balme *et al.*, 2005 ; NDong, 2003 ; Sarr *et al.*, 2011). Les températures enregistrées au cours de ces deux années d'essais ont eu des évolutions similaires et sont restées dans les mêmes ordres de grandeur quelle que soit la date de semis. Ainsi, les sommes de températures nécessaires à la mise à fleur des variétés d'une part et à leur maturité d'autre part ont été proches pour une longueur de cycle donnée. Les périodes de floraison (de maturité) des variétés de même cycle ne pouvaient alors pas différer puisque tous les plants ont été soumis aux mêmes conduites agronomiques. C'est pour cela que les variétés précoces NERICA 8 et NERICA 11 ont fleuri (atteint la maturité) aux mêmes périodes indépendamment de la date de semis et que les variétés à cycle plus long, NERICA 1 et NERICA 4 ont fleuri (atteint la maturité) aux mêmes dates. La différence variétale observée dans les périodes de mise à fleur (de maturité) est imputable à la différence naturelle dans la longueur des cycles des variétés étudiées (AfricaRice, 2008). Les températures enregistrées au cours des quatre essais étaient favorables à une bonne croissance et un bon développement des plants (Angladette, 1966). Cependant, les expérimentations de l'année 2014 ont été moins arrosées que celles de l'année 2013. En effet, le premier essai de 2014 a reçu 112 mm de pluie de moins que celui de 2013. De même, le deuxième essai de 2014 a reçu 159 mm de pluie de moins que celui de 2013. Le premier essai de 2014 a même reçu une hauteur de pluie déficitaire de 75 mm par rapport au dernier essai de 2013. Il a été enregistré moins de jours de pluies en 2014 qu'en 2013. Les périodes de déficit hydrique intra-saisonnier de la deuxième année d'essai ont été plus nombreuses et plus longues que celles de la première année. Ce climat plus sec de l'année 2014 a eu un effet négatif sur les paramètres agronomiques suivants : la hauteur, le rendement grains, le rendement paille, l'indice de récolte et le taux de stérilité des variétés de riz testées. En effet, la hauteur de ces variétés a diminué de 20 cm en passant de 81-91 cm en 2013 à 68-72 cm en 2014. Les rendements grains de NERICA 4, NERICA 8 et NERICA 11 ont diminué de moitié en passant de 1 065 -1 466 kg.ha⁻¹ en 2013 à 544-665 kg.ha⁻¹ en 2014. La diminution de

rendement grains chez NERICA 1 était d'importance moindre (17%) puisqu'il est passé de 775 kg.ha⁻¹ à 642 kg.ha⁻¹. Le développement végétatif a été plus abondant chez les variétés de riz étudiées lors de la deuxième année d'essai puisque les rendements paille et l'indice de récolte représentaient respectivement le double et la moitié de ceux de l'année 2013 (Tableaux XIV et XV). Le taux de stérilité des variétés a connu une augmentation de 40 à 92 % en passant de 40-62% en 2013 à 71-86% en 2014. Ces taux de stérilité étaient plus élevés chez les variétés à cycle plus long (NERICA 1 et NERICA 4) que chez les variétés à cycle plus court (NERICA 8 et NERICA 11) : 53% contre 41% en 2013 et 86% contre 72% en 2014. La longueur de cycle n'a eu d'effet significatif que sur le rendement grains et le nombre d'épillets par panicule en 2013. Puisqu'en cette même année, le facteur variété n'a pas eu d'effet significatif sur le rendement grains, le plus fort rendement grains obtenu chez les variétés plus précoces est essentiellement dû au fait qu'elles avaient produit plus d'épillets par panicule. En 2014, la longueur de cycle n'a eu d'effet significatif que sur l'indice de récolte et le taux de stérilité. Cela met en évidence que les rendements grains enregistrés sur chacune des deux années étaient largement tributaires de paramètres agronomiques élaborés pendant la phase reproductive des variétés. Or sur les deux années, les conditions climatiques de fin de cycle (pour les premiers essais) et de milieu et fin de cycle (pour les deuxièmes essais) ont été plus sèches. Cela s'est traduit par des températures maximales journalières de plus en plus élevées et des périodes de déficit hydrique. Les variétés à cycle plus court des premières dates de semis ont fleuri avant la survenue de cette période sèche. Cependant, la floraison des variétés à cycle plus long des premiers semis a été partiellement affectée par cette période de déficit hydrique. Les essais des deuxièmes dates de semis ont été les plus exposés à ce climat sec de la fin de la saison pluvieuse puisque cette période était intervenue avant la mise à fleur des variétés quelle que soit la longueur de leur cycle. Cette raison explique alors les forts taux de stérilité des épillets enregistrés d'une part chez les variétés à cycle plus long et d'autre part sur les essais semés tardivement tant en 2013 qu'en 2014 (Lacharme, 2001). En effet, la phase reproductive est la phase la plus sensible du cycle cultural du riz (Gaufichon *et al.*, 2010) et un déficit hydrique enregistré pendant cette phase compromet largement les rendements (Chaudhary *et al.*, 2003). Il est alors logique que les rendements grains aient baissé de l'ordre de 50 à 90% sur les essais de la deuxième date de semis comparativement à ceux des premières dates de semis. Le fait que le rendement paille ne soit pas dépendant de la date de semis ni du cycle des variétés s'explique par le fait que le stress climatique était survenu au moment où l'essentiel de la biomasse (talles et feuilles essentiellement) des variétés avait été

élaborée (AfricaRice, 2008). Les organes de riz élaborés pendant la phase reproductive ont été les plus soumis à l'effet régressif du déficit hydrique : la formation des panicules et la fécondation des épillets (Lacharme, 2001). Le fait que les poids de mille grains n'étaient pas fonction de la variété, de la longueur de cycle et de la date de semis est dû au fait que les quatre variétés étudiées ne différaient pas à l'origine par ce caractère (AfricaRice, 2008) mais aussi par le fait que les conditions climatiques qui prévalaient lors du remplissage des grains étaient similaires pour toutes les variétés dans tous les cas. L'effet négatif très prononcé de la sécheresse de fin de cycle aurait pu être atténué si les semis avaient été effectués un peu plus tôt, au plus tard 10 jours après le début de la saison des pluies puisque les plus longs cycles étaient de 100 jours et que la saison pluvieuse a eu une durée de 110-113 jours sur les deux années.

4.5 Conclusion

Les essais avaient pour objectif d'étudier l'effet de la date de semis sur les performances agronomiques de quatre variétés de riz pluvial de plateau de type NERICA. Le choix porté sur les NERICA se justifiait par le fait que ces variétés de riz se développent bien dans des environnements à faible ressource hydrique comme la zone soudano-sahélienne. Il ressort que la saison des pluies a eu une durée moyenne de 110 jours et que la gamme de températures a été favorable au bon développement des variétés de riz étudiées. Les cycles les plus longs de ces variétés étant de 100 jours, le semis des essais aurait dû se faire au plus tard 10 jours après le début de la saison des pluies. Des paramètres climatiques suivis pendant les essais, la répartition de la pluviométrie a été le facteur limitant dans l'expression des performances agronomiques des variétés étudiées. La saison des pluies, sur les deux années, a été en effet marquée par des périodes de déficit hydrique intra-saisonnier et de fin de cycle. Les périodes de déficit hydrique de fin de cycle ont été les plus déterminantes puisqu'elles ont coïncidé avec les périodes de floraison des variétés de riz étudiées. Les paramètres agronomiques élaborés pendant les phases de reproduction et de maturation des variétés de riz ont été les plus sujets à l'effet régressif de ces périodes de déficit hydrique. Ces effets ont été plus prononcés sur les essais semés un peu plus tardivement puisque, par exemple, les rendements grains des essais des deuxièmes dates de semis ont baissé d'au moins 75% par rapport à ceux des premières dates de semis. Ces pertes auraient été évitées si les semis avaient été effectués avant la cinquième pentade du mois de juillet.

Conclusion générale et perspectives

Les résultats de travaux réalisés dans le but d'évaluer les possibilités de culture du riz pluvial de plateau au Sénégal tout en adressant la problématique de la satisfaction des besoins en eau des plantes sont présentés ici.

L'étude des performances variétales a porté sur des variétés de riz de plateau choisies sur la base de leur potentiel de rendement grains, de la longueur de leur cycle (ce cycle devait être bouclé avant la fin de la saison des pluies), de la disponibilité en semences et de leur aptitude à bien se développer dans des zones à pluviométrie annuelle minimale de 600 mm et présentant des risques de sécheresse au cours du cycle cultural. Les sites des essais ont été choisis entre 12,83° et 14° de latitude nord, où le volume pluviométrique annuel diminue rapidement du sud au nord. L'analyse des données climatiques et pédologiques collectées sur les différents sites au fil des ans, a montré que la localisation géographique d'un site ne permettait pas toujours de présager du caractère humide ou sec de son climat. Les caractéristiques climatiques permettant de distinguer les sites d'étude ont été celles se rapportant à la pluviométrie. De ce fait, la phénologie, qui est plus dépendante de la température, a été très peu variable pour chaque variété étudiée. Les performances agronomiques ayant permis de distinguer les variétés entre elles ont été celles se rapportant au rendement grains et ses composantes. Le rendement grains était fortement dépendant du taux de stérilité et du poids de mille grains lorsque les conditions d'expérimentation étaient plus sèches. Par contre lorsque les conditions expérimentales étaient relativement plus humides, le rendement grains était beaucoup plus corrélé au nombre d'épillets par panicule. De toutes les variétés étudiées, les NERICAs ont eu les meilleures performances suivies des variétés asiatiques. Les variétés hybrides autres que les NERICAs ont été contre-performantes quel que soit le site et l'année d'expérimentation.

L'utilisation du modèle CERES-Rice pour la simulation de la croissance et du développement du riz a été faite dans le but *in fine* de faire des analyses de risques à partir de séries climatiques historiques. Le calibrage du modèle CERES-Rice a été satisfaisant pour la date de floraison des variétés de riz mais quelques contraintes liées à l'algorithme interne du modèle n'ont pas rendu possible le calage du modèle sur tous les types d'essais pour les paramètres portant sur les biomasses et le rendement grains. Ces contraintes internes portent sur une difficile prise en compte par le modèle de l'effet du stress hydrique et du coefficient SLPF lié

à la fertilité du sol sur la réponse des plantes. En définitive, seules les données des essais ayant le moins souffert de conditions climatiques sèches ont été utilisées pour caler et valider CERES-Rice sur le tallage et le rendement grains. CERES-Rice ne peut donc pas, dans sa version actuelle, être utilisée pour effectuer des analyses de risques climatiques puisque le déficit hydrique est la contrainte majeure dans les zones étudiées. Néanmoins, un essai d'analyse de risques agroclimatiques en riziculture pluviale au Sénégal a été effectué par l'étude de l'effet de la date de semis sur les performances agronomiques de quatre variétés de riz pluvial NERICA de plateau en zone soudano-sahélienne. Le choix porté sur les NERICAs se justifiait par le fait que ces variétés de riz se développent bien dans des environnements à faible ressource hydrique comme la zone soudano-sahélienne et aussi par le fait qu'elles ont été les plus performances des variétés que nous avons étudiées. Des paramètres climatiques suivis pendant les essais, la répartition de la pluviométrie a été le facteur limitant dans l'expression des performances agronomiques des variétés étudiées. Les périodes de déficit hydrique de fin de cycle ont été les plus déterminantes puisqu'elles ont coïncidé avec les périodes de floraison et de maturation. Les effets régressifs du climat ont été plus marqués sur les plants semés tardivement. Compte tenu de la durée moyenne de la saison humide de 100 jours dans la zone d'étude, les variétés précoces de 75-85 sont à conseiller avec des dates de semis n'excédant pas la quatrième pentade du mois de juillet pour ne pas compromettre les rendements.

Les risques agroclimatiques étaient prévus pour être examinés à l'aide du modèle de culture CERES-Rice mais compte tenu de sa contre-performance à prendre suffisamment en compte l'effet du stress hydrique sur les plants de riz, ces analyses n'ont pu atteindre les objectifs initialement fixés. L'effet de la date de semis sur les performances agronomiques des variétés de riz devrait se faire par l'analyse, sous CERES-Rice, des résultats d'une série de plusieurs dates de semis couvrant toute la saison culturale. Ces différentes analyses étaient prévues sur la base d'une longue série climatique historique (de 1950 à 2015) dans les zones de culture étudiées au chapitre 2. Par ailleurs, il était prévu l'étude de l'effet de l'interaction eau-fertilité dans ces analyses de risques. Cependant vu que le coefficient SLPF permettant de faire cette analyse s'est montré inopérant, cette dimension n'a donc pas été prospectée. Ces deux contraintes majeures (non prise en compte de l'effet de l'humectation du sol et insensibilité du coefficient SLPF) doivent être levées dans les prochaines versions de CERES-Rice pour le rendre opérationnel dans une perspective d'analyse de risques agroclimatiques.

Références bibliographiques

- ADRAO, 1986. Amélioration variétale du riz dans la Vallée du Fleuve Sénégal. Document de travail. Association pour le Développement de la riziculture en Afrique de l'Ouest. Bouaké, Côte d'Ivoire. 59 p.
- ADRAO, 1995. Formation en production rizicole, manuel du formateur, Edition Sayce publishing, Royaume Uni, 30 p.
- ADRAO, 1999. Nouveau riz pour l'Afrique...avec le coup de pouce de nos amis. Rapport annuel ADRAO. Bouaké, Côte d'Ivoire. 7 p.
- ADRAO, 2001. Collaboration ADRAO/SNRA : Potentiel d'une révolution verte dans le domaine de la riziculture en Afrique de l'Ouest et du Centre. Rapport de la deuxième réunion biennale ADRAO/Comité des experts nationaux, 20-21 mars 2000, M'bé, Bouaké, Côte d'Ivoire. 110 p.
- ADRAO, 2002. Sélection variétale participative : l'étincelle d'où jaillit la flamme. ADRAO. Bouaké, Côte d'Ivoire, 32 p.
- ADRAO, 2006. Rapport de la 5ème réunion biennale consultative du Comité des experts nationaux (NEC V). 19-20 juin 2006. Cotonou, Bénin : Centre du riz pour l'Afrique (ADRAO). 108 p.
- ADRAO, 2008. Guide pratique de la culture des NERICA de plateau 2008. Cotonou, Bénin : Centre du riz pour l'Afrique (ADRAO). 36 p.
- 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, pp. 191-203.
- AfricaRice, 2008. *NERICA : the New Rice for Africa – a Compendium*. Africa Rice Center (WARDA). Cotonou, Benin. 210 p.
- Aggarwal P.K., Banerjee B., Daryaei M.G., Bhatia A., Bala A., Rani S., Chander S., Pathak H., Kalra N., 2006a. InfoCrop: A dynamic simulation model for the assessment of crop yield, losses due to pest, and environmental impact of agro-ecosystem in tropical environments: II. Performance of the model. *Agric. Syst.* **89**:47-67.
- Aggarwal P.K., Kalra N., Chander S., Pathak H., 2006b. InfoCrop:A dynamic simulation model for the assessment of crop yield, losses due to pest, and environmental impact of agroecosystem in tropical environments: I. Model description. *Agric. Syst.* **89**:1-25.
- Aggarwal P. K., Kropff M. J., Teng P. S., Khush G. S., 1996. The challenge of integrating systems approach in plant breeding: Opportunities, accomplishments and limitations. In: Kropff M. J., Teng P. S., Aggarwal P. K., Bouman B., Bouma J., Van Laar H. H. (Eds.). Applications of systems approaches at the field level. Kluwer Acad. Pub. Netherlands, 1-24 pp.
- Ahmad S., Ahmad A., Soler C. M. T., Ali H., Zia-Ul-Haq M., Anothai J., Hussain A., Hoogenboom G., Hasanuzzaman M., 2012. Application of the CSM-CERES-Rice

- model for evaluation of plant density and nitrogen management of fine transplanted rice for an irrigated semiarid environment. *Precision Agric* (2012) **13**: 200–218.
- Akinbile C.O., Sangodoyin A.Y., Akintayo I., Nwilene F.E., Nwilene F.. 2007. Growth and Yield Responses of Upland Rice (NERICA) under Different Water Regimes in Ibadan, Nigeria. *Research Journal of Agronomy*, **1** (2): 71-75.
- Alhassane A., Salack S., Ly M., Lona I., Traoré S. B., Sarr B., 2013. Evolution des risques agroclimatiques associés aux tendances récentes du régime pluviométriques en Afrique de l’Ouest soudano-sahélienne. *Sécheresse*, **24** (4) : 282-293.
- Alocilja E. C., Ritchie J. T., 1988. Upland rice simulation and its use in multicriteria optimization. *IBSNAT Research Project Series* **01**, IBSNAT. 95 p
- Amiri E., Rezaei M., Bannayan M., Soufizadeh S., 2013. Calibration and Evaluation of CERES Rice Model under Different Nitrogen- and Water-Management Options in Semi-Mediterranean Climate Condition. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, **44**:1814–1830.
- Angladette A., 1966. *Le riz*. Maisonneuve et Larose. Paris, France, 930 p.
- APRAO, 2011. Guide pratique pour la gestion intégrée de la production du riz irrigué. Juillet 2011. 10 p.
- APRAO, 2012. Projet Amélioration de la Production du Riz en Afrique de l’Ouest en Réponse à la Flambée des Prix des Denrées Alimentaires (GCP/RAF/453/SPA)/ Composante Sénégal. Version provisoire, mai 2012. Ministère de l’Agriculture. Dakar. Sénégal. 49 p.
- Arradeau M.A., 1998. *Le riz irrigué*. Maisonneuve et Larose. Montpellier, France, 321 p.
- Arradeau M. A., Vergara B. S., 1992. *Manuel illustré de riziculture pluviale*. IRRI-IRAT, 287 p.
- Balme M., Galle S., Lebel T., 2005. Démarrage de la saison des pluies au Sahel : variabilité aux échelles hydrologique et agronomique, analysée à partir des données EPSAT-Niger. *Sécheresse* **16** (1) : 15-22.
- Barbier B., 1998. Induced innovation and land degradation: Results from a bioeconomic model of a village in West Africa. *Agricultural Economics* **19**: 15–25.
- Barney P. C., 2002. Simulating seed reserve mobilization and seedling growth of rice in DSRICE 1. *Field Crops Research*, **76** (1): 55-69.
- Baron C., Sultan B., Balme M., Sarr B., Traoré S., Lebel T., Janicot S., Dingkuhn M., 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.
- Bartlett M. S., 1937. Properties of sufficiency and statistical tests. *Proceedings of the Royal Statistical Society. Series A* **160**: 268–282.
- Bastiaans L., 1991. Quantification of crop growth and yield reduction in rice due to foliar diseases using simulation and systems analysis. Description of an approach. *Phytopathology* **80**: 611-615.
- BBCH, 2001. *Stades phénologiques des mono-et dicotylédones cultivées 2*. Édition, 2001. Rédigé par Uwe Meier. Centre Fédéral de Recherches Biologiques pour l’Agriculture et les Forêts. 166 p.

- Bezançon G., 1993. Le riz cultivé d'origine africaine *Oryza glaberrima* Steud. et les formes sauvages et adventices apparentées : diversité, relations génétiques et domestication. *Thèse de doctorat. Université de Paris-Sud Centre d'Orsay*. 234 p.
- Birch C. J., Carberry P. S., Muchow R. C., McCown R. L., Hargreaves J.N.G. 1990. Development and evaluation of a sorghum model based on CERES-Maize in a semi-arid tropical environment. *Field Crops Research*, **24**: 87-104.
- Bois J. F., Couchat P., Moutonnet P., 1984a. Etude de la réponse un stress hydrique de quelques variétés de riz pluvial et de riz irrigué. I. Incidence sur la transpiration. *Plant and Soil* **80**: 227-236.
- Bois J. F., Couchat P., Moutonnet P., 1984b. Etude de la réponse un stress hydrique de quelques variétés de riz pluvial et de riz irrigué. II. Incidence sur les échanges de CO₂ et l'efficience de l'eau. *Plant and Soil* **80**: 237-246.
- Boote K.J., Kropff M.J., Bindraban P.S., 2001. Physiology and modelling of traits in crop plants: implications for genetic improvement. *Agricultural Systems* **70**: 395-420.
- Bouman B. A. M., 1993. ORYZA-W, Rice growth model for irrigated and water-limited conditions. SARP paper, CABO-DLO, Wageningen, 67 p.
- Bouman B.A.M., Kropff M.J., Tuong T.P., Wopereis M.C.S., Ten Berge H.F.M., Van Laar H.H., 2001a. *ORYZA2000: Modeling Lowland Rice*. International Rice Research Institute, Los Banos, Philippines. 235 p.
- Bouman B. A. M., Tuong T. P., 2001b. Field water management to save water and increase its productivity in irrigated rice. *Agricultural Water Management* **49**:11–30.
- Bouman B.A.M., Van Laar H.H., 2006. Description, evaluation of the rice growth model ORYZA 2000 under nitrogen-limited conditions. *Agric. Syst.* **87** : 249–273.
- Brüntrup M., Nguyen T., Kaps C., 2006. Le marché du riz au Sénégal. In Agriculture et développement rural, 1, 2006. Pp 23-26. <http://www.rural21.com>.
- Chaudhary R. C., Nanda J. S., Tran D. V., 2003. *Guide d'identification des contraintes de terrain à la production de riz*. Commission internationale du riz. FAO. Rome, Italie. 66 p.
- Cheyglinted S.; Ranamukhaarachchi S.L.; Singh G. 2001. Assessment of the CERES-Rice model for rice production in the central plain of Thailand. *Journal of Agricultural Science* **137**: 289-298.
- Chopart J.L., 1980. Étude au champ des systèmes racinaires des principales cultures pluviales au Sénégal (Arachide, mil, sorgho, riz pluvial). *Thèse de Doctorat. Institut National Polytechnique de Toulouse*, Toulouse, France, 160 p.
- CNS, 2014. *Catalogue national des espèces et variétés agricoles du Burkina Faso*. Comité National des Semences. Ouagadougou. Burkina Faso. 81 p.
- Courtois B., 2007 : Une brève histoire du riz et de son amélioration génétique. Cirad, France, 13 p.
- CSAO, 2011. Crise rizicole de 2008 : chocs en nouveaux enjeux. Club du Sahel et de l'Afrique de l'Ouest (CSAO/OCDE). In Enjeux ouest africains N°2 juin 2011. Paris, France. 12 p.
- Dancette C., 1983. Estimation des besoins en eau des principales cultures pluviales en zone soudano-sahélienne. *L'Agron. Trop.* **38** (4) : 281-294.

- De Vries M., Meertens B., 2014. *Améliorer la riziculture de bas-fonds*. Conseils pratiques de gestion à l'usage des petits paysans en Afrique tropicale. Série Agrodok. Fondation Agromisa et CTA. Wageningen, Netherlands. 102 p.
- Del Villar P. M., Bauer J.-M., Maiga A., Ibrahim L., 2011. Crise rizicole, évolution des marchés et sécurité alimentaire en Afrique de l'Ouest. Ministère des Affaires étrangères. France. 61 p.
- Dembélé V., Dakouo D., Ouédraogo M., 2005. Problématique de la commercialisation du paddy et stratégies d'adaptation des producteurs dans les périmètres irrigués de l'ouest du Burkina Faso. Atelier régional sur les politiques rizicoles et sécurité alimentaire en Afrique Sub-saharienne, Bobo-Dioulasso, Burkina Faso, 17 p.
- Diagne A., Midingoyi S.-K. G., Wopereis M., Akintayo I., 2010. The NERICA Success Story: Development, Achievements and Lessons Learned. The Africa Rice Center (AfricaRice). Cotonou, Bénin. 29 p.
- Dieng A., Sagna M., Babou M., Dione F., Diallo B., 2011. Analyse de la compétitivité du riz local au Sénégal. Programme de renforcement de la recherche sur la sécurité alimentaire en Afrique de l'Ouest. Résumé n°1-2011-12. Michigan State University. 9 p.
- Dingkuhn M., Le Gal P.Y., Poussin J.-C., 1995. RIDEV : un modèle de développement du riz pour le choix des variétés et des calendriers. In : Boivin P. (ed.), Dia I. (ed.), Lericollais A. (ed.), Poussin J.-C. (ed.), Santoir C. (ed.), Seck S.M. (ed.) Nianga, laboratoire de l'agriculture irriguée en moyenne vallée du Sénégal. Atelier ORSTOM-ISRA Saint-Louis. p. 205-222.
- Diouf M., Nonguierma A., Abou A., Royer A., Somé B., 2000. Lutte contre la sécheresse au Sahel : acquis et perspective au Centre Régional Agrhymet. *Sécheresse*, **11** (4): 257-266.
- Djiba S., Coly J.P., 2007. Guide de production de riz en Casamance. Document interne ISRA. 37 p.
- Dobelmann J.-P., 1976. *Riziculture pratique 2. Riz pluvial*. Techniques vivantes. Presses Universitaires de France. 131 p.
- Drenth H., Ten Berge H.F.M., Riethoven J.J.M., 1994. ORYZA simulation modules for potential and nitrogen limited rice production. In SARP Research Proceedings. Int. Rice Res. Inst., Los Banos, Philippines. 223 p.
- Durufle G., 1996. Tendances, contraintes et perspectives de l'Agriculture sénégalaise. Document de réflexion stratégique. ENGR, Outremont, Québec H2V 3J7, Canada, 104 p.
- Elings A., Rubia E. G., 1994. Models for crop-patho systems rice-bacterial leaf blight, sheath blight and stem borer. SARP, AB-DLO, TPE-WAU. Wageningen, IRRI, Los Banos, 102 p.
- ENDA DIAPOL, 2010. Implication des acteurs ruraux dans la définition des politiques de développement des filières vivrières en Afrique de l'Ouest et du Centre. Rapport de mission au Sénégal. Document provisoire. 64 p. www.fidafrique.net.
- FAO, 2008. *Catalogue ouest africain des espèces et variétés végétales*. FAO Rome, Italie. 107 p.

- FAO, 2011. Aperçu du développement rizicole au Sénégal. Division de la production végétale et de la protection des plantes (AGP) de la FAO. Bureau Afrique de l'Ouest. Dakar. Sénégal. 10 p.
- Feng L., Bouman B. A. M., Tuong T. P., Cabangon R. J., Li Y., Lu G., Feng Y., 2007. Exploring options to grow rice using less water in northern China using a modeling approach, I: Field experiments and model evaluation. *Agricultural Water Management* **88**:1–13.
- Forest F., Cortier B., 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. Proceedings of an International Workshop, 18- 23 February, 1991, Niamey, Niger, IAHS Press, Institute of Hydrology, Wallingford, United Kingdom. pp. 547–559.
- Gaufichon L., Prioul J-L, Bachelier B., 2010. *Quelles sont les perspectives d'amélioration génétique de plantes cultivées tolérantes à la sécheresse ?* Fondation pour l'agriculture et la ruralité dans le monde. Paris, France, 60 p.
- Gerardeaux E., Giner M., Ramanantsoanirina A., Dusserre J., 2012. Positive effects of climate change on rice in Madagascar. *Agron. Sustain. Dev.* **32**: 619–627.
- Gijsman A.J., Hoogenboom G., Parton W.J., Kerridge P.C., 2002. Modifying DSSAT Crop Models for Low-Input Agricultural Systems Using a Soil Organic Matter–Residue Module from CENTURY. *Agronomy Journal* **94**: 462–474.
- Godwin D.C., Jones C.A., 1991. Nitrogen Dynamics in Soil-Plant Systems, in: Modeling Plant and Soil Systems. Hanks J. et Ritchie J. T. (eds). pp. 287–321.
- Godwin D. C., Singh U., Buresh R. J., De Datta S. K., 1990. Modeling of nitrogen dynamics in relation to rice growth and yield. In: Proceedings 14 th International Congress Soil Science Transactions. Kyoto, Japan. Aug. 1990, Vol.IV, Int. Soc. Of Soil Science. 320-325 pp.
- Gouranga K., Ashwani K., Chandra B. B., 2007. Spectral properties analysis and crop growth simulation modelling in rice. Research Bulletin No. 38, Water Technology Centre for Eastern Region (Indian Council of Agriculture Research). Orissa, India. 28 p.
- Graf B., Dingkuhn M., Schnier F., Coronel V., Akita S., 1991. A simulation model form the dynamics of rice growth and development. III. Validation of the model with yielding varieties. *Agric. Syst.* **36**: 329-349.
- Graf B., Rakotobe O., Zahner P., Delucchi V., Gutierrez A. P., 1990. A simulation model form the dynamics of rice growth and development. I. The carbon balance. *Agric. Syst.* **32**: 341-365.
- Gueye A. A., 2004. Etude bibliographique sur la filière riz au Sénégal. Rapport final. Observatoire national du riz au Sénégal. Dakar, Sénégal. 71 p.
- Hammer G. L, Muchow R. C., 1994. Assessing Climatic Risk to Sorghum Production in Water-Limited Subtropical Environments 1 Development and Testing of a Simulation Model. *Field Crops Research* **36**: 221-234.
- Hoogenboom G., Jones J.W., Wilkens P.W., Porter C.H., Boote K.J., Hunt L.A., Singh U., Lizaso J.L., White J.W., Uryasev O., Royce F.S., Ogoshi R., Gijsman A.J., Tsuji G.Y.,

2010. Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT) Version 4.5 [CD-ROM]. University of Hawaii, Honolulu, Hawaii.
- Hoogenboom G., Jones J.W., Wilkens P.W., Porter C.H., Boote K.J., Hunt L.A., Singh U., Lizaso J.L., White J.W., Uryasev O., Ogoshi R., Koo J., Shelia V., Tsuji G.Y., 2015. Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT) Version 4.6 [CD-ROM]. DSSAT Foundation, Prosser, Washington, USA.
- Horie T., 1987. A model for evaluating climatic productivity and water balance of irrigated rice and its application to southeast Asia. *Southeast Asian Studies*. **25**: 62-74.
- Hunt L. A., Pararajasingham S., Jones J. W., Hoogenboom G., Imamura D., T., Ogoshi R. M., 1993. GENCALC software to facilitate the use of crop models for analyzing field experiments. *Agronomy. J.*, **85**:1090–1094.
- IBSNAT, 1990. IBSNAT progress report 1987-1990. International Benchmark Site Network for Agrotechnology Transfer, Honolulu, USA. 54 p.
- IER, 2009. Fiches techniques sur les variétés de riz pluvial NERICA. Institut d'Economie Rurale. Direction scientifique. Mali. 14 p.
- INTA, 2011. Inta Fortaleza secano. Variedad de arroz para secano. Instituto Nicaragüense de Tecnología Agropecuaria. 2 p.
- IPCC, 2007. *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Parry M. L., Canziani O. F., Palutikof J. P., van der Linden P. J., Hanson CE (Eds.), Cambridge University Press: Cambridge, UK. 976 p.
- IRAT, 1967. Les variétés de riz du Cercle de Banfora. *Agron. Trop.* 691-707.
- IRRI, 1985. The flowering response of the rice plant to photoperiod. A review of the literature, fourth edition. International Rice Research Institute. Los Baños, Laguna, Philippines, 61 p.
- IRRI, 2002. *Standard evaluation system for rice*. Philippines: International Rice Research Institute, Manila, Philippines. 56 p.
- IRRI, 2005. Wild rice taxonomy. International Rice Research Institute. 38 p.
- ISRA, 2012. *Catalogue officiel des espèces et variétés cultivées au Sénégal*. Ministère de l'Agriculture et de l'équipement rural. Dakar, Sénégal. 212 p.
- Jones C.A., Kiniry, J.R., 1986. *CERES-Maize: A Simulation Model of Maize Growth and Development*. Texas A&M University Press, College Station, 194 p.
- Jones J., Hoogenboom G., Porter C., Boote K., Batchelor W., Hunt L., Wilkens P., Singh U., Gijssman A., Ritchie J., 2003. The DSSAT cropping system model. *European Journal of Agronomy* **18**: 235–265.
- Jones J.W., 1993. Decision support system for agricultural development. In: Penning de Vries, F.W.T., Teng, P.S., Metselaar, K. (Eds.), *Systems Approaches for Agricultural Development*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, pp. 459–472.
- Jones M.P., Dingkuhn M., Aluko G.K., Semon M. 1997a. Interspecific *Oryza sativa* × *O. glaberrima* Steud. progenies in upland rice improvement. *Euphytica*, **92**: 237-246.
- Jones M.P., Dingkuhn M., Johnson D.E., Fagade S.O., 1997b. Interspecific hybridization: progress and prospect. WARDA. Bouaké, Côte d'Ivoire. p. 21-29.

- Kaneda C., 2007. Breeding and disseminating efforts of NERICA: Efforts for dissemination of Nerica in Africa. Japan Association for International Collaboration of Agriculture and Forest. Review article. *Journal of Japanese Tropical Agriculture* **51** (4) 145- 151, 2007.
- Kelly V., Reardon T., Fall A., Diagona B. N., 1993. Impact des politiques de prix et de revenus sur la consommation et l'offre des produits agricoles. Volume 1 & 2, partie I & II. Rapport final du Projet ISRA/IFPRI. 93 p.
- Kijima, Y. Sserunkuuma, D., Otsuka, K., 2006. How revolutionary is the “NERICA revolution” evidence from uganda. *The Developing Economies*, **44** (2) : 252-267.
- Kite R., 1993. Senegal: Implications for the Rice Policy Dialogue. USAID/Dakar. 43 p.
- Kouakou K. P., 2013. Contribution à l'amélioration de la prévision agricole 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 de doctorat. Université Cheikh Anta Diop, Dakar, Sénégal.* 96 p.
- Kouakou K. P.-M., Muller B., Fofana A., Guisse A., 2016. Performances agronomiques de quatre variétés de riz pluvial NERICA de plateau semées à différentes dates en zone soudano-sahélienne au Sénégal. *Journal of Applied Biosciences* **99** : 9382-9394.
- Kropff M. J., Van Laar H. H., 1993. *Modelling crop-weed interactions*. CAB International. Wallingford, United Kingdom. 274 p.
- Kropff M. J., Van Laar H. H., Matthews R. B., Ten Berge H. F. M., 1994. ORYZA 1, an ecophysiological model for irrigated rice production. Simulation and Systems Analysis for Rice Production (SARP), IRRI. 100 p.
- Lacharme M., 2011. Le plan de riz : données morphologiques et cycle de la plante 22 p.
- Lancashire, P. D., Bleiholder H., Langelüddecke P., Stauss R., Van Den Boom T., Weber E., Witzemberger A., 1991. An uniform decimal code for growth stages of crops and weeds. *Ann. appl. Biol.* **119**, 561-601.
- Lebel T., Ali A., 2009. Recent trends in the Central and Western Sahel rainfall regime (1990-2007). *Journal of Hydrology* **375** : 52-64.
- Lodoun T., Giannini A., Traoré P.S., Somé L., Sanon M., Vaksmann M., Millogo Rasolodimby J.. 2013. Changes in seasonal descriptors of precipitation in Burkina Faso associated with late 20th century drought and recovery in West Africa. *Environmental Development* **5** : 96-108.
- Magne C., 1975. Sept années d'expérimentation multilocale sur les variétés de riz en culture pluviale au Sénégal (1967-1973). *Agronomie Tropicale* **39** (1) : 19-27.
- Mayer J., Bonnefond R., 1973. *Les rizicultures paysannes: améliorations possibles*. Secrétariat d'Etat aux affaires étrangères, Paris, France, 216 p.
- McMennamy J. A., O'Toole J. C., 1983. RICEMOD: A physiological based rice growth and yield model. *IRRI Research paper series*. **87**: 33 p.
- Ndjiondjop M.-N., Manneh B., Cissoko M., Drame N.K., Kakai G.K., Bocco R., Baimey H., Wopereis, M. 2010. Drought resistance in an interspecific backcross population of rice (*Oryza* spp.) derived from the cross WAB56-104 (*O. sativa*) × CG14 (*O. glaberrima*). *Plant Science* **179** : 364–373.

- NDong J. B., 2003. Caractérisation de la saison des pluies dans le centre-ouest du Sénégal. *Publication de l'Association Internationale de Climatologie* **15** : 326-332.
- PARPEBA, 2006. Rapport du diagnostic participatif du terroir du site de Thiaré Ndoffane. Projet d'Amélioration et de Renforcement des Points d'Eau dans le Bassin Arachidier. Dakar, Sénégal 70 p.
- Parton W.J., Stewart J.W.B., Cole C.V., 1988. Dynamics of C, N, P and S in grassland soils: a model. *Biogeochemistry* **5**: 109–131.
- PCE, 2013. Rapport définitif des résultats de l'étude de la cartographie de la diffusion des nouvelles variétés de riz NERICA dans les zones sud, est et centre du Sénégal. Projet Croissance Economique. USAID. United States Agency for International Development. Pennsylvania. Washington. 80 p.
- Penning de vries F. W. T., Jansen D. M., Ten Berge H. F. M., Bakema A. H., 1989. Simulation of ecophysiological processes in several annual crops. Simulation monograph. PUDOC, Wageningen, The Netherlands, 271 p.
- Peugeot C. 1995. Influence de l'encroûtement superficiel du sol sur le fonctionnement hydrologique d'un versant sahélien. *Thèse de doctorat. Université de Grenoble, France*, 305 p.
- Plantureux S., Girardin P., Fouquet D., Chapot J. Y., 1991. Évaluation et analyse de sensibilité du modèle CERES-Maize en conditions alsaciennes. *Agronomie*. **11** : 1-8
- PNAR, 2009. Stratégie Nationale de Développement de la Riziculture. Programme National d'autosuffisance en riz. Ministère de l'Agriculture. Dakar, Sénégal. 26 p.
- Porterès R., 1949. Le système de riziculture par franges univariétales et l'occupation des fonds par les riz flottants dans l'Ouest-africain. *Rev. dnt. Bot. Agpl. A g . Trop.* no **325-326**, pp 553-563.
- Porterès R., 1955. Historique sur les échantillons d'*Oryza glaberrima* St. recueillis en Afrique. *J.A.T.B.A. T II, N° 10-11*, Oct.-Nov. 1955. pp 535-537.
- Porterès R., 1956. Taxonomie agronomique des riz cultivés *O.sativa* Linné et *O. glaberrima* Steudel. *J.A.T.B.A. Vo1.3*, Juillet-Décembre 1956, No 7 à 12.
- R Core Team, 2013. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical computing, Vienna, Austria. (<http://www.R-project.org>).
- Renard C., 1983. Adaptation du riz pluvial au déficit hydrique. *Tropicultura*. **1** (4) : 128-132.
- Reyniers F. N., Truong B., Bois J. F., Bonnim E., Thomin G., 1980. Caractérisation de l'enracinement du riz pluvial *in situ* avec le phosphore-32. IRAT, IDESSA. Bouaké, Côte d'Ivoire. 635-647 p.
- Riethoven J. J. M., Ten Berge H. F. M., Drenth H. (Eds.), 1995. *Software developments in the SARP Project: a guide to applications and tools*. SARP Research Proceedings. AB-DLO/Wageningen, WAU-TPE/Wageningen, IRRI/ Los Banos. 301 p.
- 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, pp. 41–54.
- Sagna P., Ndiaye O., Diop C., Niang A. D., Sambou P. C., 2015. Les variations récentes du climat constatées au Sénégal sont-elles en phase avec les descriptions données par les scénarios du GIEC ? *Pollution atmosphérique* **227** : 1-17.

- Salack S., 2006. Evaluation des changements climatiques sur la culture du riz pluvial et irrigué dans les pays du CILSS. *Rapport de stage*. Centre régional AGRHYMET, Département Formation et Recherche. 29 p.
- Salack S., Giannini A., Diakhaté M., Gaye A. T., Muller B., 2014. Oceanic influence on the sub-seasonal to interannual timing and frequency of extreme dry spells over the West African Sahel. *Clim Dyn* (2014) **42**: 189.
- Salack S., Muller B., Gaye A. T., 2011. Rain-based factors of high agricultural impacts over Senegal. Part I: integration of local to sub-regional trends and variability. *Theor Appl Climatol* **106**: 1-22.
- Salack S., Muller B., Gaye A. T., Hourdin F., Cisse N., 2012. Analyses multi-échelles des pauses pluviométriques au Niger et au Sénégal. *Sécheresse*. **23** (1): 3-13.
- 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., Sarr B., Baron C., Gozé E., Maraux F., Clerge, B., Dingkuhn M., 2001. La prévision agricole à l'échelle du Sahel, in: Modélisation des agrosystèmes et aide à la décision. Malezieux E., Trebreil G., Jaeger M. (eds). CIRAD-INRA, pp. 243-261.
- Sarr B., Kafando L. et Atta S., 2011. Identification des risques climatiques de la culture du maïs au Burkina Faso. *Int. J. Biol. Chem. Sci.* **5** (4): 1659-1675.
- Saseendran S. A., Singh K. K., Rathore L. S., Rao P., Mendiratta N., Lakshmi K., Narayan S. and Singh V., 1998. Evaluation of the CERES-Rice version 3.0 model for the climate conditions of the state of Kerala, India. *Meteorol. Appl.* **5**: 385-392 (1998).
- Scoones I., 1995. Living with uncertainty: New Directions in Pastoral Development in Africa. Intermediate Technology Publications Ltd, London. p 1-36
- Seck M., 2015. Autosuffisance en riz : 600 000 t de riz blanc attendues au Sénégal selon Macky Sall. In Agriinfos Mensuel d'informations Agricoles et rurales - 9e Année - N° 81 - Issn 0850-8844. Avril 2015. 4 p. www.inter-reseaux.org.
- Seck P. A., Touré A. A., Coulibaly J. Y., Diagne A., Wopereis M. C. S., 2013. Africa's rice economy before and after the 2008 rice crisis. AfricaRice, Cotonou, Bénin. 11 p.
- Séré Y., Adjepoua A., Sanoussi F., 1994. Stratégie de développement de la production de riz pluvial et de bas-fond au Burkina Faso. Ministère de l'Agriculture et des ressources animales, Ouagadougou, Burkina Faso, 124 p.
- Shapiro S. S., Wilk M. B., 1965. An analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika*. **52** (3-4) : 591-611.
- Sié M., 1991. Prospection et Evaluation Génétique des Variétés Traditionnelles de riz (*O. sativa* L. et *O. glaberrima* Steud.) du Burkina Faso. *Thèse de Doctorat Ingénieur. Université Nationale de Côte d'Ivoire*. 125 p.
- Sié M., 1997. Analyse des contraintes photothermiques en vue de l'adaptation des variétés de riz irrigué au Sahel. *Thèse de doctorat. École Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier*, Montpellier, France, 138 p.
- Sivakumar M.V.K., 1988. Predicting rainy season potential from the onset of rains in Southern Sahelian and Sudanian climatic zones of West Africa. *Agricultural and Forest Meteorology* **42** : 295-305.

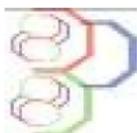
- Sivakumar M.V.K., Konaté M., Virmani S.M., 1984. *Agroclimatology of West Africa: Mali*. Information Bulletin 19. International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics (ICRISAT), Patancheru P.O., Andhra Pradesh 502324, India, 294 p.
- Soil Conservations Service, 1972. National Engineering Handbook, in: Hydrology Section 4, USDA, Washington, USA. 450 p.
- Soler C. M. T., Sentelhas P. C., Hoogenboom G., 2007. Application of the CSM-CERES-Maize model for planting date evaluation and yield forecasting for maize grown off-season in a subtropical environment. *Europ. J. Agronomy* **27**: 165–177.
- Spitters C. J. T., Van Keulen H., Van Kraalingen D. W. G., 1989. A simple and universal crop growth simulator: SUCROS87. In Rabbinge R., Ward S. A., Van Laar H. H.(Eds.). *Simulation and systems management in crop protection*. Simulation Monographs. Wageningen Netherlands. Pudoc. 147-181 pp.
- Sultan B., Janicot S., Baron C., Dingkuhn M., Muller B., Traoré S., Sarr B., 2008. Les impacts agronomiques du climat en Afrique de l’Ouest : une illustration des problèmes majeurs. *Sécheresse* **19**: 29–37.
- Swaminathan M. S., 1984. Rice. *Scientific American*. **250** (1): 62-71.
- Sweeney M., McCouch, S., 2007. The complex history of the domestication of rice. *Annals of Botany* **100** : 951–957.
- Ten Berge H. F. M., Wopereis M. C. S., Reithoven J. J. M., Thiyagarajan T. M., Sivasamy R., 1994. The Oryza-0 model applied to optimize nitrogen use in rice. In: Nitrogen economy of irrigated rice, field and simulation studies. SARP Research Proceedings, DLO Research Institute for Agrobiolgy and Soil fertikity, Wageningen, The Netherlands, 235-253 pp.
- Timsina J., Humphreys E., 2010. Applications of CERES-Rice and CERES-Wheat in Research, policy and climate change studies in Asia: a review. *International Journal of Agricultural Research* **5** (8): 587-610.
- Timsina J., Godwin D., Humphreys E., Singh Y., Singh B., Kukal S. S., Smith D., 2008. Evaluation of options for increasing yield and water productivity of wheat in Punjab, India, using the DSSAT-CSM-CERES-wheat model. *Agricultural Water Management* **95**:1099–1110.
- Traoré S. B., Reyniers F. N., Vaksmann M., Koné B., Sidibé A., Yoroté A., Yattara K., Kouressy M., 2000. Adaptation à la sécheresse des écotypes locaux de sorgho du Mali. *Sécheresse* **11** (4) : 227-37.
- Tukey J., 1949. Comparing Individual Means in the Analysis of Variance. *Biometrics* **5** (2): 99–114.
- Van Diepen C. A., Rappoldt C., Wolf J., Van Keulen H., 1988. Crop growth simulation model WOFOST. Documentation version 4.1. Centre for world Food Studies. Amsterdam, Netherlands, 299 p.
- Van Laar H.H., Goudriaan J., Van Keulen H. (eds). 1997. SUCROS97: simulation of crop growth for potential and water limited production situations. Quantitative approaches in systems analysis 14. C.T. de Wit graduate school for production ecology and AB-DLO, Wageningen, The Netherlands. 479 p.

- Vilayvong, S.; Banterng, P.; Patanothai, A.; Pannangpetch, K. 2012. Evaluation of CSM-CERES-Rice in simulating the response of lowland rice cultivars to nitrogen application. *Australian Journal of Crop Science* **6**: 1534-1541.
- Vilayvong S., Banterng P., Patanothai A., Pannangpetch K., 2015. CSM-CERES-Rice model to determine management strategies for lowland rice production. *Sci. agric.* **72** (3): 229-236.
- Volvey A., Dévérin Y., Houssay-Holzschuch M., Rodarry E., Surun I., Bennafla K., 2005. *L'Afrique*. Collection Clefs-concours, Atlande, France, 288 p.
- WARDA. 2006. Africa Rice Center (WARDA) Annual Report 2005-2006, Providing what's needed, Cotonou, Benin 52 p.
- Williams J., Jones C., Dyke P., 1984. A modeling approach to determining the relationship between erosion and soil productivity. *Transactions of the ASABE* **27**: 129–144.
- Willmott C., 1982. Some Comments on the Evaluation of Model Performance. *American Meteorological Society* **63**: 1309–1369.
- Witzenberger A., Hack H., Van Den Boom T., 1989: Erläuterungen zum BBCH Dezimal-Code für die Entwicklungsstadien des Getreides – mit Abbildungen. *Gesunde Pflanzen* **41**: 384-388.
- Wopereis M.C.S., Bouman B.A.M., Tuong T.P., Ten Berge H.F.M, Kropff M.J. 1996. ORYZA_W: Rice growth model for irrigated and rainfed environments. In SARP Research Proceedings. Wageningen (Netherlands); IRRI/AB-DLO. 159 p.
- Wopereis M.C.S., Defoer T., Idinoba P., Diack S., Dugué M-J., 2008. Curriculum d'apprentissage participatif et recherche action (APRA) pour la gestion intégrée de la culture de riz de bas-fonds (GIR) en Afrique subsaharienne : Manuel technique. Cotonou, Bénin: le Centre du riz pour l'Afrique (ADRAO). 128 p.
- Yoshida S., 1973. Effects of temperature on growth of the rice plant (*Oryza sativa* L.) in a controlled environment. *Soil Sci. Plant Nutr.* **19**(4): 299-310.
- Yoshida S., 1975. Factors that limit the growth and yields of upland rice. In The International Rice Research Institute. Major research in upland rice. Los Banos, Philippines. Pp 46-71.
- Yoshida S., 1981. *Fundamentals of Rice Crop Science*. IRRI, Manila, Philippines, 269 p.

Annexes

Annexe 1 : Article issu des travaux de la thèse et publié

Kouakou *et al.* *J. Appl. Biosci.* 2016 Performances agronomiques de quatre variétés de riz pluvial NERICA de plateau semées à différentes dates en zone soudano-sahélienne au Sénégal



Journal of Applied Biosciences 99:9382 – 9394

ISSN 1997–5902

Performances agronomiques de quatre variétés de riz pluvial NERICA de plateau semées à différentes dates en zone soudano-sahélienne au Sénégal

Kouakou K. P-M^{1, 2,3 (*)}, Muller B^{3,4,5}, Fofana A⁶, Guisse A¹.

¹ Université Cheikh Anta Diop de Dakar, Avenue Cheikh Anta Diop, BP 5005 Dakar, Sénégal

² Institut National Polytechnique Félix Houphouët Boigny, BP 1313 Yamoussoukro, Côte d'Ivoire

³ Centre d'Étude Régional pour l'Amélioration de l'Adaptation à la Sécheresse, BP 3320 Thiès-Escale, Thiès, Sénégal

⁴ Centre du Riz pour l'Afrique, Station Sahel, BP 96 Saint-Louis, Sénégal

⁵ Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement, Umr Agap, F-34398 Montpellier, France

⁶ Institut Sénégalais de Recherches Agricoles, CNRA de Bambey, BP 53 Bambey, Sénégal

(*) Auteur correspondant : kkomartial@gmail.com

Original submitted in on 20th January 2016. Published online at www.m.elewa.org on 31st March 2016
<http://dx.doi.org/10.4314/jab.v99i1.4>

RÉSUMÉ

Objectif : Le Sénégal est à 80% tributaire du marché international pour satisfaire sa demande intérieure en riz. Pourtant cet aliment occupe une place de premier choix dans l'alimentation quotidienne des sénégalais. Les autorités et les partenaires au développement œuvrent alors, depuis ces deux dernières décennies, à réduire la dépendance du pays vis-à-vis du riz importé à travers l'augmentation de la production nationale. Le présent travail s'inscrit dans cette dynamique. Elle s'intéresse particulièrement à l'étude, en conditions strictement pluviales, des performances agronomiques de deux variétés de riz NERICA à cycle de 75-85 jours (NERICA 8 et NERICA 11) et de deux variétés de riz NERICA à cycle de 95-100 jours (NERICA 1 et NERICA 4).

Méthodologie et résultats : Pour ce faire, deux essais ont été semés à Sinthiou Malème, pendant la saison des pluies, à des dates décalées en 2013 et répétés en 2014. Chaque année, le semis du premier essai a été effectué pendant la cinquième pentade du mois de juillet et le deuxième pendant la deuxième pentade du mois d'août. Les résultats ont montré que la saison des pluies a duré 110 jours et a été caractérisée par des périodes de déficit hydrique qui ont coïncidé avec la phase reproductive des variétés de riz étudiées. Ce déficit hydrique a perturbé la formation des panicules et la fécondation des épillets. L'effet de ce déficit hydrique a été plus prononcé sur les semis tardifs d'une part (baisse de rendement grains de 75 à 79%) et sur les variétés à cycle plus long d'autre part (baisse de rendement grains pouvant atteindre 42%).

Conclusion et application des résultats : Les quatre variétés de riz NERICA pluvial étudiées peuvent certes être cultivées dans la zone soudano-sahélienne de Sinthiou Malème mais il faut préférer les variétés très précoces de 75-85 jours (NERICA 8 et NERICA 11) et les semer avant la cinquième pentade du mois de juillet pour ne pas compromettre les rendements grains.

Mots-clés : date de semis, zone soudano-sahélienne, NERICA, performances agronomiques, riz pluvial, Sénégal.

Annexe 2 : Résultats d'analyse de sols prélevés sur les sites expérimentaux

| site | année | horizon (cm) | code échantillon | argile (%) | limon (%) | sable (%) | pH eau | pH KCl | C (‰) | N(‰) | C/N |
|-----------------|-------|--------------|------------------|------------|-----------|-----------|--------|--------|-------|-------|--------|
| Darou Pakathiar | 2014 | 0-10 | D41 | 5.68 | 3.17 | 91.65 | 6.70 | 6.20 | 3.006 | 0.116 | 25.846 |
| Darou Pakathiar | 2014 | 10-20 | D42 | 6.68 | 2.63 | 91.35 | 7.70 | 7.70 | 3.507 | 0.144 | 24.277 |
| Darou Pakathiar | 2014 | 20-30 | D43 | 4.75 | 6.55 | 90.00 | 7.30 | 7.00 | 2.728 | 0.114 | 23.831 |
| Kolda | 2013 | 0-10 | K31 | 5.50 | 6.00 | 89.70 | 6.00 | 5.40 | 5.464 | 0.496 | 11.006 |
| Kolda | 2013 | 10-20 | K32 | 9.50 | 6.00 | 85.50 | 5.80 | 5.20 | 4.772 | 0.579 | 8.240 |
| Kolda | 2013 | 20-30 | K33 | 4.75 | 6.50 | 90.00 | 5.70 | 4.90 | 3.527 | 0.414 | 8.526 |
| Kolda | 2014 | 0-10 | K41 | 8.28 | 7.25 | 86.50 | 5.90 | 5.40 | 5.233 | 0.191 | 27.430 |
| Kolda | 2014 | 10-20 | K42 | 15.07 | 6.63 | 80.00 | 5.70 | 4.90 | 3.785 | 0.191 | 19.843 |
| Kolda | 2014 | 20-30 | K43 | 6.15 | 6.95 | 88.40 | 5.20 | 4.50 | 3.062 | 0.191 | 16.049 |
| Séfa | 2013 | 0-10 | F31 | 10.25 | 6.25 | 84.85 | 5.80 | 4.50 | 4.427 | 0.414 | 10.700 |
| Séfa | 2013 | 10-20 | F32 | 17.75 | 5.25 | 78.55 | 5.30 | 5.00 | 4.357 | 0.165 | 26.331 |
| Séfa | 2013 | 20-30 | F33 | 5.25 | 5.00 | 90.45 | 5.50 | 4.60 | 3.597 | 0.662 | 5.433 |
| Sinthiou Malème | 2013 | 0-10 | S31 | 6.45 | 4.55 | 90.65 | 5.50 | 4.60 | 2.874 | 0.178 | 16.113 |
| Sinthiou Malème | 2013 | 10-20 | S32 | 10.83 | 5.03 | 86.00 | 5.20 | 4.40 | 2.560 | 0.229 | 11.165 |
| Sinthiou Malème | 2013 | 20-30 | S33 | 3.40 | 4.68 | 91.45 | 5.30 | 4.70 | 2.038 | 0.229 | 8.887 |
| Sinthiou Malème | 2014 | 0-10 | S41 | 3.50 | 6.00 | 90.30 | 5.70 | 4.90 | 4.150 | 0.414 | 10.031 |
| Sinthiou Malème | 2014 | 10-20 | S42 | 13.75 | 7.50 | 81.25 | 5.60 | 4.70 | 2.490 | 0.372 | 6.687 |
| Sinthiou Malème | 2014 | 20-30 | S43 | 4.75 | 6.25 | 88.40 | 5.70 | 4.80 | 2.213 | 0.290 | 7.643 |

Annexe 3 : Caractéristiques de la pluviométrie des sites des essais

| Site | Année | Code site- année | Date de semis | DSP | FSP | LSP | DDS | Pluviomé- trie (mm) | Pluvio essai (mm) (*) | Nb de jours de pluie | Nb de jours de pluie essai (**) |
|-----------------|-------|---------------------|------------------|--------|--------|-----|-----|------------------------|-----------------------------|----------------------------|--|
| Darou Pakathiar | 2012 | DAR12 | 20-Jul | 27-Jun | 05-Oct | 100 | 23 | 800.4 | 699.4 | 35 | 30 |
| Sinthiou Malème | 2012 | SIN12 | 17-Jul | 29-Jun | 07-Oct | 100 | 18 | 790.4 | 626.6 | 34 | 28 |
| Kolda | 2012 | KOL12 | 21-Jul | 12-Jun | 11-Oct | 121 | 39 | 1198.4 | 820.6 | 58 | 41 |
| Séfa | 2012 | SEF12 | 23-Jul | 19-Jun | 08-Oct | 111 | 34 | 1180.6 | 779.8 | 51 | 37 |
| Darou Pakathiar | 2013 | DAR13 | 17-Jul | 03-Jul | 07-Oct | 96 | 14 | 843.6 | 713.6 | 33 | 27 |
| Sinthiou Malème | 2013 | SIN13 | 21-Jul | 20-Jul | 11-Oct | 83 | 1 | 652.5 | 530 | 36 | 29 |
| Kolda | 2013 | KOL13 | 10-Jul | 10-Jul | 07-Oct | 89 | 0 | 682.9 | 595.4 | 33 | 25 |
| Séfa | 2013 | SEF13 | 13-Jul | 29-Jun | 02-Nov | 126 | 14 | 986.4 | 778.4 | 50 | 42 |
| Sinthiou Malème | 2014 | SIN14 | 25-Jul | 19-Jul | 20-Oct | 93 | 6 | 649.6 | 466.5 | 26 | 19 |
| N'Dama | 2014 | NDA14 | 11-Aug | 05-Aug | 19-Oct | 75 | 6 | 488.5 | 391.5 | 24 | 18 |
| Kolda | 2014 | KOL14 | 1-Aug | 16-Jul | 15-Oct | 91 | 16 | 808.2 | 541.2 | 40 | 27 |

DSP: date de début de la saison des pluies

FSP: date de fin de la saison des pluies

LSP: durée (jours) de la saison des pluies

DDS: durée (jours) entre début de la saison des pluies et la date de semis

* hauteur de pluie tombée au cours de l'essai

** nombre de jours de pluie enregistré au cours des essais

Annexe 4 : Modèles de culture disponibles pour le riz (Gouranga *et al.*, 2007)

| Nom du modèle | Domaine d'application | Source |
|---------------|---|--|
| RICEMOD | Photosynthèse, respiration, croissance | Mc Mennamy et O'Toole, 1983 |
| SIMRIW | Croissance et développement, indice de récolte | Horie, 1987 |
| CERES RICE | Croissance et développement du riz, composantes du rendement pour différentes variétés dans différentes conditions agro-climatiques | Godwin <i>et al.</i> , 1990; Alocilja et Ritchie, 1988 |
| WOFOST | Phénologie, développement foliaire, interception du rayonnement, respiration, allocation des ressources de la photosynthèse | Van Diepen <i>et al.</i> , 1988 |
| MACROS-LID | Processus de croissance de la plante, photosynthèse, mouvements hydriques | Penning de vries <i>et al.</i> , 1989 |
| SUCROSE | Croissance de la plante en présence/absence de stress hydrique en particuliers pour le blé et le maïs | Spitters <i>et al.</i> , 1989; Van Laar <i>et al.</i> , 1997 |
| RICESYS | Croissance et développement du riz | Graf <i>et al.</i> , 1990 et 1991 |
| LIDFDE | Modèle standard pour les maladies foliaires | Bastiaans, 1991 |
| SAWAH | Module de bilan hydrique | Ten Berge <i>et al.</i> , 1992 |
| INTERCOM | Modèle écophysiological pour les interactions plante-adventices | Kropff et van Laar, 1993 |
| LOWBALL | Bilan hydrique en riziculture irriguée | Bouman, 1993 |
| ORYZA-W | Croissance et développement du riz | Bouman, 1993; Wopereis <i>et al.</i> , 1996 |
| ORYZA-1 | Croissance et développement, photosynthèse, respiration | Kropff <i>et al.</i> , 1994 |
| ORYZA-0 | Phénologie, développement foliaire, interception du rayonnement, respiration, allocation des ressources de la photosynthèse | Ten Berge <i>et al.</i> , 1994 |
| ORYZA-N | Croissance et développement, photosynthèse, respiration, nutrition azotée, allocation de l'azote au sein des organes végétaux | Drenth et Berge, 1994 |
| BLIGHT | Maladies du riz | Elings et Rubia, 1994 |
| MANAGE-N | Phénologie, indice de surface foliaire, interception de la lumière, respiration, allocation des ressources de la photosynthèse à travers de simples coefficients | Riethoven <i>et al.</i> , 1995; Ten Berge <i>et al.</i> , 1996 |
| ORYZA-1N | Importance relative des caractéristiques de la plante | Aggarwal <i>et al.</i> , 1996 |
| ORYZA-2000 | Croissance et développement, photosynthèse, respiration, nutrition azotée, allocation de l'azote au sein des organes végétaux, évapotranspiration, bilan hydrique | Bouman <i>et al.</i> , 2000 |
| DS RICE 1 | Germination de la graine et stade juvénile de la plante | Barney, 2002 |
| INFOCROP | Effet des maladies et ennemis des cultures | Aggarwal <i>et al.</i> , 2006a, b |

Annexe 5 : Quelques caractéristiques des essais utilisés pour les travaux de modélisation

| Groupe essai | Site | Année | Nature essai | Code essai | SEM (j) | AL (%) | MO (%) | STRI | TERM | GEST | PLUIE (mm) |
|-----------------|-----------------|-------|------------------|---------------|------------|-----------|-----------|------|------|------|---------------|
| 1 | Sefa | 2013 | biomasse | bse13 | 196 | 16.58 | 7.10 | 5 | 5 | 5 | 614.8 |
| 1 | Kolda | 2012 | variété | vko12 | 203 | 16.78 | 6.93 | 5 | 5 | 5 | 814.8 |
| 1 | Sefa | 2013 | variété | vse13 | 194 | 16.58 | 7.10 | 5 | 5 | 5 | 614.6 |
| 2 | Kolda | 2014 | biomasse | bko14 | 215 | 16.78 | 6.93 | 5 | 5 | 5 | 539.8 |
| 2 | Kolda | 2014 | variété | vko14 | 213 | 16.78 | 6.93 | 5 | 5 | 5 | 539.8 |
| 2 | Sinthiou Malème | 2014 | variété | vsi14 | 206 | 13.92 | 5.08 | 5 | 5 | 5 | 466.5 |
| 3 | Darou Pakathiar | 2013 | variété | vda13 | 198 | 9.82 | 5.30 | 3 | 2 | 4 | 706.4 |
| 4 | Sinthiou Malème | 2014 | biomasse semis 1 | bsi114 | 205 | 11.45 | 5.30 | 5 | 4 | 5 | 466.5 |
| 4 | Sinthiou Malème | 2013 | biomasse semis 2 | bsi213 | 217 | 10.77 | 5.71 | 5 | 5 | 5 | 479.5 |
| 4 | Sinthiou Malème | 2014 | biomasse semis 2 | bsi214 | 220 | 11.22 | 4.85 | 5 | 5 | 5 | 376.5 |
| 4 | Diéricao | 2014 | paysan | pdk14 | 214 | 9.82 | 5.30 | 5 | 3 | 3 | 461.3 |
| 4 | Ndama | 2014 | paysan | pnd14 | 223 | 9.82 | 5.30 | 5 | 3 | 3 | 391.5 |
| 5 | Kolda | 2013 | biomasse | bko13 | 192 | 12.75 | 7.89 | 5 | 2 | 5 | 540.2 |
| 5 | Sinthiou Malème | 2013 | biomasse semis 1 | bsi113 | 203 | 10.77 | 5.71 | 5 | 5 | 5 | 518 |
| 5 | Darou Pakathiar | 2012 | variété | vda12 | 202 | 9.82 | 5.30 | 3 | 4 | 4 | 689.97 |
| 5 | Kolda | 2013 | variété | vko13 | 191 | 12.75 | 7.89 | 5 | 3 | 5 | 571.2 |
| 5 | Sefa | 2012 | variété | vse12 | 205 | 12.50 | 4.82 | 5 | 4 | 5 | 773 |
| 5 | Sinthiou Malème | 2012 | variété | vsi12 | 199 | 10.21 | 5.68 | 5 | 5 | 4 | 613.6 |
| 5 | Sinthiou Malème | 2013 | variété | vsi13 | 202 | 11.64 | 4.28 | 5 | 4 | 5 | 530 |

| | |
|-------|--|
| SEM | date calendaire de semis |
| AL | taux d'argile et de limon contenu dans le sol |
| MO | taux de matière organique contenue dans le sol |
| STRI | absence de Striga dans les parcelles |
| TERM | absence d'attaque de termites sur les plants |
| GEST | qualité de la gestion agronomique de l'essai |
| PLUIE | quantité d'eau de pluie reçue par les plants |

Auteur : Kouadio Paul-Martial KOUAKOU

Evaluation des possibilités de culture du riz pluvial et risques climatiques associés au Sénégal

Résumé

La politique affichée de l'Etat du Sénégal à développer le riz pluvial couplée à une augmentation des volumes pluviométriques et une mise à la disposition des riziculteurs de variétés de riz pluvial à cycle court et à haut rendement grains ont contribué à l'extension des rizières pluviales en dehors des zones traditionnelles de culture. La thèse a pour objectif d'étudier les possibilités de culture du riz pluvial au Sénégal ainsi que les risques agroclimatiques liés à cette activité. Pour ce faire, des variétés de riz supposées adaptées aux écologies à climat fluctuant et à pluviométrie modérée ont été mises en essais dans trois zones agroécologiques du Sénégal : le Bassin arachidier, le Sénégal oriental et la Casamance. Trois groupes de variétés ont été étudiées : des variétés hybrides NERICA, des variétés asiatiques *Oryza sativa* (L.) et des variétés hybrides autres que les NERICAs. Sur trois années d'expérimentation, les meilleures performances agronomiques ont été observées avec les NERICAs. Les variétés asiatiques avaient des performances moyennes et les autres types d'hybrides avaient les plus faibles performances. En année de bonne pluviométrie, les variétés très précoces se sont montrées plus performantes sur les sites situés au nord de la zone étudiée c'est-à-dire dans le Bassin arachidier et au Sénégal oriental. Indépendamment de l'année, les plants de riz ont été moins performants dans le Bassin arachidier que dans les trois autres zones. Quatre des meilleures variétés, des NERICAs, ont été utilisées pour paramétrer le modèle de culture CERES-Rice en vue d'effectuer des analyses de risques agroclimatiques. Le calibrage du modèle a révélé des dysfonctionnements graves liés à la non opérationnalité des modules prenant en compte le bilan hydrique et le paramètre de fertilité SLPF. CERES-Rice mérite alors d'être amélioré pour être apte à effectuer des analyses de risques agroclimatiques puisque les contraintes majeures dans les zones rizicoles pluviales demeurent la problématique de la satisfaction des besoins en eau et en nutriments des plants.

Mots-clés : Modèle de culture, CERES-Rice, riz pluvial, NERICA, *Oryza sativa* (L.), risques agroclimatiques, Sénégal

Evaluation of the possibilities of cultivating rainfed rice under climatic risks in Senegal

Abstract

In order to reduce the quantity of imported rice, policies in Senegal decided to develop rainfed rice. The thesis aims to study the possibility of cultivating rainfed rice and the climatic risks in Senegal. Trials have been carried out on some rice varieties which were supposed to be suitable for soudano-sahelian environments. Three agroecological zones have been chosen for the trials: Bassin arachidier, Sénégal oriental and Casamance. Three groups of rice have been tested: NERICAs, *Oryza sativa* (L.) and hybrid varieties different from NERICAs. The results showed that NERICAs had the best agronomic traits compared to the other groups. During the year of abundant rainfall, the yields of the shortest cycle length varieties were better in the north zones, especially in the Bassin arachidier. During the three trial years, the lowest agronomic traits were observed in that agroecological zone. Four of the best rice varieties over all the experimentations were used to calibrate the crop model CERES-Rice embedded on DSSAT v 4.6. The parameterization was operated on NERICA 1, NERICA 4, NERICA 8 and NERICA 11. The aim of the procedure of parameterization was to perform some agroclimatic risks linked to rainfed rice. Unfortunately, it has been discovered that CERES-Rice was unable to take into account the effects of limit water supply on rice plants development and grain filling. Moreover, the SLPF parameter that modulates the soil fertility was not operable on CERES-Rice. The crop model CERES-Rice must therefore be ameliorated before performing climatic risks.

Keywords : Crop model, CERES-Rice, rainfed rice, NERICA, *Oryza sativa* (L.), agroclimatic risks, Senegal

Spécialité: Production et protection des végétaux