

UNIVERSITE DE THIES



Ecole Doctorale Développement Durable et Société

ED 2DS

THESE DE DOCTORAT

Mention : agronomie

Présentée par
Omar Ndaw FAYE

**SELECTION DE VARIETES DE RIZ POUR LA TOLERANCE A LA
SALINITE - MECANISMES AGRONOMIQUES ET
PHYSIOLOGIQUES DEVELOPPES**

Soutenue publiquement le 02 Novembre 2016 devant le jury composé de :

- Président :** Papa Ibra SAMB, Professeur Titulaire UCAD
- Examineurs :** Baboucarr MANNEH, Chercheur AfricaRice Saint Louis
Tala GUEYE, Maître – assistant, ENSA/UT
- Rapporteurs :** Mamadou GUEYE, Professeur Titulaire USSEIN/Kaolack
Saliou NDIAYE, Maître de conférences ENSA/UT
Mouhameth CAMARA, Maître de conférences ISFAR/UT
- Directeur de thèse :** Abdoulaye DIENG, Maître de conférences ENSA/UT

DEDICACES

A mon défunt père Abdou FAYE et ma défunte belle-mère Fatou DOUCOURE. QUE DIEU LES ACCUEILLE AU PARADIS

A ma mère que DIEU lui donne une très longue vie et une très bonne santé

A mon épouse NDEYE SINE TOURE, pour son soutien et à mes enfants

A mon grand frère Serigne Cheikh pour tout son encadrement, à Ndeye, Maty, Awa, pape, Ted, Ada et Codou

A mes bijoux, Diarra, Ada-Awa et Bousso

A toute la 12 ème promotion de ENSA

A mes amis d'enfance Mara, Bangaly, Pape, Demba, Assane et Ousmane

A tous les sélectionneurs du « Groupe d'Action de Sélection Variétale Riz d'Afrique » et au Pr Sié Moussa son coordonnateur

REMERCIEMENTS

Je remercie d'abord le Recteur de l'Université de Thiés.

Je remercie le Directeur de l'ED2DS.

Je tiens à exprimer mes plus vifs remerciements au Pr Abdoulaye DIENG mon Directeur de thèse pour avoir soutenu mon dossier d'inscription à l'ED2DS, supervisé l'ensemble de mes travaux. Sa compétence, sa rigueur scientifique et sa clairvoyance m'ont beaucoup appris.

J'ai beaucoup de reconnaissance et d'admiration à témoigner au Dr Tala GUEYE qui est un modèle professionnel pour sa gestion calme de son temps pourtant si chargé de responsabilités importantes et bien sûr pour sa maîtrise remarquable de notre domaine de recherche.

J'adresse toute ma gratitude au Dr Baboucarr MANNEH pour tout son soutien et son encadrement qui m'ont aidé dans la réalisation de ce travail.

J'exprime tous mes remerciements à l'ensemble des membres de mon jury : Pr Pape Ibra SAMB, Pr Mamadou GUEYE, Pr Saliou NDIAYE, Pr Mouhameth CAMARA, Pr Abdoulaye DIENG, Dr Baboucarr MANNEH et Dr Tala GUEYE

J'adresse mes remerciements sincères au Dr Pape Abdoulaye SECK, d'abord en tant que Directeur de AfricaRice pour m'avoir mis dans de très bonnes conditions de réalisation de ces travaux, puis en tant que Ministre de l'Agriculture et de l'Équipement Rural pour le rétablissement de ma bourse GRiSS, pour son soutien et ses conseils et orientations.

Je souhaiterais exprimer ma gratitude au Dr Alioune FALL, Directeur Général de l'ISRA, pour ses orientations et pour m'avoir permis de réaliser ce travail

Mes remerciements vont également au Dr Elhadji TRAORE, Directeur Scientifique de l'ISRA, pour ses conseils, ses orientations

Je sais infiniment gré au Dr Abdou Aziz MBAYE, Directeur du CRA de Saint Louis, pour son soutien moral et la supervision de tous mes travaux de recherches.

De même, je suis particulièrement reconnaissant au Dr Kabirou NDIAYE, Chef de station AfricaRice Saint Louis et à tous les chercheurs, techniciens et ouvriers agricoles

Un grand merci au Dr Ibn DIENG, biométricien à AfricaRice Cotonou pour les formations en statistiques

Ma reconnaissance va à l'endroit de M. Sada SY, Directeur Régional de Développement Rural et à toute son équipe

Ces remerciements seraient incomplets si je n'en adressais pas à MM. Samba KANTE, Directeur Général de la SAED, Seyni Ndao adjoint DG, Amadou THIAM, Paul Marie DIOMAYE FAYE et à l'ensemble des travailleurs de la SAED

Je souhaiterais aussi adresser ma gratitude à tous les chercheurs de l'ISRA, pour leur appui et leurs conseils, Dr Ndiaga CISSE, Cheikh Alassane FALL, Mamadou LO, Amadou FOFANA, Cheikh Tidiane DIOP, Cheikh SALL et à tous les chercheurs du Centre de Saint-Louis Dr Mamadou NDIAYE (appui, conseils et corrections du document), Souleymane DIALLO, Madiama CISSE, Amadou Abdoulaye FALL, Mamadou SALL, Ramatoulaye NDIAYE, Diatta MARONE, mon neveu Malick NDIAYE, Aliou SEYDI, aux Chefs Administratif Abdou Aziz NGOM et Comptable Saïbane CISSOKHO, Ta Marème, Fota, Coumba, Adiara, Adjì, Suzane, Ndeye mes amis Samba, Ahmadou, Pape, Moussa, Gerard. Sans vous, aucune activité ne peut se réaliser, Amadou Ndiaye, Chef de station de Nioro, M. Gaye de l'OLAG, mes amis Issa, Basse, Codou, Khalile, Bodian du CERAAS et CNRA pour votre soutien

Mon travail de recherche sur le terrain a été particulièrement facilité par une équipe technique Faza, Aziz, Djibril, Issa, Bocar, Amadou, Sarr, Birame, Doudou Mbaye, Tanor Kanté ...

Je tiens à exprimer tout particulièrement ma reconnaissance à Mme Sarr Seynabou DIOUF ma promotionnaire de thèse et toute la douzième promotion de l'ENSA ainsi que l'ensemble des élèves ingénieurs sortis de cette école

Ce travail a été financé par le GRiSS, USAID-ERA et ISRA-CRA Saint Louis. Je remercie :

- L'IRRI (International Rice Research Institute), à travers M. Noel P. MAGOR pour avoir sélectionné mon dossier de candidature et AfricaRice pour la supervision des travaux
- Le Représentant de l'USAID/ERA au Sénégal et son équipe pour leur soutien financier pour la réalisation de certaines activités
- L'ISRA pour m'avoir autorisé à effectuer ces travaux, toute l'équipe du CRA de Saint Louis et l'ensemble des autres centres
- L'AfricaRice et toute son équipe
- Au GCP pour les renforcements de capacités en statistiques, biologie moléculaire et gestion des données à travers Ndeye Ndack

RÉSUMÉ GENERAL

Le développement de la production rizicole en Afrique est devenu un sacerdoce pour les États. En Afrique de l'Ouest, on assiste à la course vers l'autosuffisance en riz, avec des programmes d'aménagements hydro agricoles, d'innovations de technologies agricoles et de renforcement de toute la chaîne de valeur. Cette dynamique enclenchée après la crise du riz de 2007/2008, nécessite l'accompagnement d'une recherche soutenue qui anticipe sur les problèmes de productions, en développant de nouvelles stratégies d'adaptation durables. La salinité des sols fait partie des contraintes majeures à la production rizicole. A partir d'une approche de sélection variétale participative, des essais de criblage de variétés de riz pour la salinité ont été conduits au Sénégal, en Gambie et au Mali. Les résultats ont permis de classer les variétés par pays et confirmé les performances de quelques-unes choisies par les producteurs. 16 variétés sélectionnées et 8 autres variétés ajoutées ont été par la suite évaluées au champ dans quatre environnements de soit, soit 0 ; 3 ; 6 et 9 dS/m. La classification de K-means suivant les incidences du sel sur les paramètres agronomiques a permis de classer les variétés. En serre, l'étude des réactions agro morphologiques des variétés durant leur phase végétative a permis de montrer une incidence croissante en valeur absolue de la salinité sur les paramètres étudiés. L'analyse des concentrations en Na⁺ et en K⁺ dans différentes parties des variétés a montré les mécanismes de tolérance à la salinité tels que la restriction de l'entrée des ions sodium au niveau racinaire, le transfert des ions toxiques vers la tige et les feuilles âgées et l'ajustement ionique avec le potassium. Cette série d'essais a permis d'avoir une liste de variétés élités tolérantes à la salinité : D14 ; WAS 73-B-B-231-4 ; IR 59418-7B-21-3 ; 72593-B-3-2-3-8 et IR 71991-3R-2-6-1.

Mots clés : riz, salinité, mécanismes de tolérance, sélection variétale participative, Afrique de l'Ouest

GENERAL ABSTRACT

Rice development in Africa has become a priesthood for the States. In west Africa, it's now the race towards rice self-sufficiency by the hydro-agricultural development programs, agricultural technologies innovations and strengthening value chain. This dynamic, triggered after the 2007/2008 rice crisis, requires the support of sustained research that anticipates production problems and develops new sustainable adaptation strategies. Soil salinity is one of the major constraints to rice production. Screening trials with 40 rice varieties for salinity were conducted in Senegal, Mali and Gambia by a participatory varietal selection approach. The results permitted to classify the varieties by country and confirmed the performances varieties selected by producers. 16 varieties selected in this trial and 8 added were evaluated in the field in four salinity environments: 0; 3; 6 and 9 dS / m. K-means classification according salinity incidence on the agronomic parameters permitted to classify the varieties. In greenhouse, the agro morphological reactions study of varieties during their vegetative phase showed an increasing salinity incidence in absolute value on parameters studied. Concentrations Na⁺ and K⁺ analyse in diferent varieties parts showed such as the restriction entry of sodium ions into the root level, the transfer of toxic ions to the stem and the aged leaves and the ionic adjustment with potassium. This series of tests yielded a list of elite varieties tolerant to salinity: D14; WAS 73-B-B-231-4; IR 59418-7B-21-3; 72593-B-3-2-3-8 and IR 71991-3R-2-6-1.

Key words: Rice, salinity, tolerance mechanism, participatory varietal selection, West Africa

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

AMMI: Additive Main effects and Multiplicative Interaction
ANCAR : Agence National de Conseil Agricole et Rural
ARICA: Advanced Rice for Africa
BMS : Breeding Management System
BV: Breeding View
CE : Conductivité Electrique
CEDEAO : Communauté Economique Des Etats de l'Afrique de l'Ouest
CERAAS : Centre d'Etudes Régional pour l'Amélioration de l'Adaptation à la Sécheresse
CILSS : Comité permanent Inter-Etats de Lutte contre la Sécheresse dans le Sahel
CIRAD : Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement
CNCSP : Comité National Consultatif Semence et Plants
CNRA : Centre National de Recherches Agronomiques
CRA : Centre de Recherches Agricoles
DAP: Diammonium phosphate
DG : Directeur Général
DHS : Distinction Homogénéité Stabilité
DRDR : Direction Régionale de Développement Rural
dS/m : déci-siemens par mètre
E: Environnement
ED2DS : Ecole Doctorale Développement Durable et Société
ENSA : Ecole Nationale Supérieure d'Agriculture
ESP : Exchangeable Sodium Percentage
FAO : Food and Agriculture Organization of the United Nations
FAT : Farmers Advanced Trial
GCP : Groupe Challenge Programme
GNIS: Groupement National Interprofessionnel des Semences et plants
GRiSS : Global Rice ScholarShip
GXE : Interactions Génotypes et Environnements
IRRI: International Rice Research Institute
ISRA : Institut Sénégalais de Recherches Agricoles
KAFACI: Korea - Africa Food and Agriculture Cooperative Initiative
OLAG : Office du Lac de Guiers
PAT: Participatory Advanced Trial

PET: Participatory Evaluation Trial

PET: Participatory Evaluation Trial

QTL : Quantitative Trait Loci

SAED : Société Nationale d'Exploitation des Terres du Delta du Fleuve Sénégal et des Vallées du Fleuve Sénégal et de la Falémé

SES: Standard Evaluation System for rice

SMR : Suivi des Marchés Riz

SPV : Sélection Variétale Participative

STRASA : Stress Tolerant Rice for Africa and South Africa

TDS : Quantité Totale de Matière Dissoutes

UEMOA : Union Economique et Monétaire Ouest Africaine

UPOV : Union internationale pour la Protection des Obtentions Végétales

USAID-ERA: United States Agency for International Development – Education Research Agriculture

USD : Union States Dollar

VATE : Valeur Agronomique Technologique et Environnementale

LISTE DES FIGURES ET FICHE

Figure 1: Evolution du gap entre la production locale et la consommation en Afrique de l'Ouest	7
Figure 2 : Répartition superficies cultivées en Afrique par agro-écologie	10
Figure 3 : Répartition des gaps de rendement	11
Figure 4: Evolution du Ph sites du Mali.....	30
Figure 5: Evolution CE sites du Mali.....	31
Figure 6: Evolution de CE Ndiol (Sénégal)	32
Figure 7 : Analyse des composantes principales de rendement – Corrélation entre les différents paramètres étudiés.....	42
Figure 8 : Évolution de la conductivité électrique de la lame d'eau au niveau des parcelles dans les différents environnements suivant les dates de mesures.	52
Figure 9 : Évolution de la conductivité électrique dans les différents environnements suivant les dates de mesures de l'eau de la nappe dans les piézomètres	53
Figure 10 : Évolution des moyennes de ph dans différents environnement en fonction des dates de mesure	53
Figure 11 : Analyse de composantes principales – corrélation entre les paramètres	62
Figure 12 : AMMI	81
Figure 13 : Evolution de la teneur en sodium des racines au niveau des différents bacs (Na ⁺¹ ; N ⁺² ; Na ⁺³ respectivement de CE moyenne 2,3 ; 6,5 et 9,6 dS/m).....	91
Figure 14 : Evolution de la teneur en sodium des tiges au niveau des différents bacs (Na ⁺¹ ; N ⁺² ; Na ⁺³ respectivement de CE moyenne 2,3 ; 6,5 et 9,6 dS/m)	92
Figure 15 : Evolution de la teneur en sodium des limbes des feuilles mortes au niveau des différents bacs (Na ⁺¹ ; Na ⁺² ; Na ⁺³ respectivement de CE moyenne 2,3 ; 6,5 et 9,6 dS/m)...	92
Figure 16 : Evolution de la teneur en sodium des gaines des feuilles mortes au niveau des différents bacs (Na ⁺¹ ; N ⁺² ; Na ⁺³ respectivement de CE moyenne 2,3 ; 6,5 et 9,6 dS/m) ..	93
Figure 17 : Evolution de la teneur en sodium des limbes des feuilles vertes au niveau des différents bacs (Na ⁺¹ ; N ⁺² ; Na ⁺³ respectivement de CE moyenne 2,3 ; 6,5 et 9,6 dS/m) ..	94
Figure 18 : Evolution de la teneur en sodium des gaines des feuilles vertes au niveau des différents bacs (Na ⁺¹ ; N ⁺² ; Na ⁺³ respectivement de CE moyenne 2,3 ; 6,5 et 9,6 dS/m) ..	94
Figure 19: Moyenne des concentrations (en µg/g PS) de potassium des échantillons dans les différents bacs	96
Fiche 1 : Enquêtes	30

LISTE DES ALBUMS

Album 1: Photos Dispositif au niveau des bacs	71
Album 2 : Présence sel sur les gaines - Nona Bokra (étiquette 14) et IR 71991-3R-2-6-1 (étiquette 8).	81

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Evolution des productions (en tonnes) de riz local des années 1970 à 2010.	7
Tableau 2 : Répartition des superficies en hectares des systèmes de production dans 3 pays de STRASA Afrique Ouest.....	10
Tableau 3 : Fiche de caractérisation DHS	20
Tableau 4 : Liste des variétés et leur généalogie.....	28
Tableau 5 : Variétés choisies par les producteurs au Mali	33
Tableau 6 : Variétés choisies par les producteurs en Gambie.....	33
Tableau 7 : Variétés choisies par les producteurs – Site de Ndiol	34
Tableau 8 Moyennes nombre moyen de talles (TM)	36
Tableau 9 : Moyennes Rendement (Kg / ha).....	38
Tableau 10 : Pedigree des variétés choisies par les producteurs.....	40
Tableau 11 : Variétés sélectionnées pour les essais multi locaux (avancés).....	44
Tableau 12 : Liste des variétés et leur généalogie.....	49
Tableau 13 : Moyennes de nombre de panicules par plant issues de l'analyse GXE	55
Tableau 14 : Moyennes de la hauteur en cm des plants issues de l'analyse GXE	57
Tableau 15 : Moyennes du nombre de jours à la maturité issues de l'analyse GXE	58
Tableau 16 : Moyennes du poids en Kg de la biomasse aérienne par variété issues de l'analyse GXE.....	60
Tableau 17 : Moyennes du rendement en grains en kg/ha par variété issues de l'analyse GXE	61
Tableau 18 : Moyennes des variables dans les différentes classes.....	62
Tableau 19 : Résultats Classification K-means dans l'environnement E3.....	63
Tableau 20 : Moyennes des incidents en % des différents paramètres étudiés utilisée par K-means.....	63
Tableau 21 : Classification des variétés par K-means.....	63
Tableau 22 : Liste des variétés	70
Tableau 23 : Moyenne CE dans les bacs après l'analyse de variance de l'interaction de la salinité au niveau des seaux et les environnements (bacs).....	74
Tableau 24 : Moyennes des Incidences de la salinité sur le nombre plants repris après GxE au niveau des environnements, 74 jours après semis, dans des conditions de salinité de 6 dS/m et 9 dS/m.	75
Tableau 25 : Moyennes des paramètres analysés par environnement.....	76
Tableau 26 : Incidence du niveau de salinité sur le nombre de talles de chaque variété après analyse GXE.....	77
Tableau 27 : Incidents moyens du niveau de salinité sur la hauteur des plants après analyse GXE.....	78
Tableau 28 : Incident des niveaux de salinité sur le nombre de feuilles vertes par plant	79
Tableau 29 : Moyennes des incidents sur paramètres	80
Tableau 30 : Classification K-means	80
Tableau 31 : Répartition des concentrations de sodium (en µg/g PS) au niveau des différents échantillons dans l'environnement de 9,6 dS/m.....	95

Table des matières

DEDICACES	i
REMERCIEMENTS	ii
LISTE DES FIGURES ET FICHE	vii
LISTE DES ALBUMS	vii
LISTE DES TABLEAUX	viii
CHAPITRE 0 : INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
CHAPITRE I : RIZ ET SALINITE	6
I. IMPORTANCE DU RIZ	6
II. SYSTEME DE PRODUCTION DU RIZ	8
III. LES CONTRAINTES A LA PRODUCTION DU RIZ	11
IV. SALINITE	12
V. MECANISMES DE TOLERANCE A LA SALINITE	14
VI. SELECTION VARIETALE POUR LA TOLERANCE DU RIZ A LA SALINITE	15
VII. DISCUSSIONS ET CONCLUSIONS	17
CHAPITRE II : EVALUATION PARTICIPATIVE DE VARIETES DE RIZ DANS LES ZONES SALEES DU SENEGAL, MALI ET DE LA GAMBIE	23
I. INTRODUCTION	23
II. MATERIEL ET METHODES	25
III. RESULTATS	33
IV. DISCUSSIONS	39
V. CONCLUSION	44
CHAPITRE III : EFFETS DE LA SALINITE AU CHAMP SUR DES PARAMETRES AGRONOMIQUES DE 23 VARIETES DE RIZ	47
I. INTRODUCTION	47
II. MATERIEL ET METHODES	48
III. RESULTATS	54
IV. DISCUSSION	64
V. CONCLUSION	66
CHAPITRE IV : CRIBLAGE DE VARIETES DE RIZ DANS DIFFERENTES CONDITIONS DE SALINITE DURANT LEUR PHASE VEGETATIVE	68
I. INTRODUCTION	68
II. MATERIEL ET METHODES	69
III. RESULTATS	74
IV. DISCUSSIONS	82
V. CONCLUSION	85
CHAPITRE V : MECANISMES PHYSIOLOGIQUES DE TOLERANCE A LA SALINITE DE VARIETES DE RIZ	88

I.	INTRODUCTION	88
II.	MATERIEL ET METHODES	89
III.	RESULTATS	90
IV.	DISCUSSIONS	96
V.	CONCLUSION	98
CHAPITRE VI : DISCUSSION GENERALE		100
CHAPITRE VII : CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES		105
	<i>Bibliographie</i>	109
ANNEXE		119

CHAPITRE 0 : INTRODUCTION GÉNÉRALE

L'Afrique a connu une très longue histoire de production rizicole. La domestication des espèces de riz africain date de plus de 3000 ans avant JC. Durant la colonisation, les Portugais avaient introduit l'espèce asiatique au XVI^e siècle et la bande côtière de l'Afrique de l'Ouest se nommait « Côte de riz » (Chang, 1983). La forte croissance démographique de l'Afrique : 2,5% contre 1,2% pour le reste du monde, et son urbanisation, estimée à 38% avec une augmentation à 48 % d'ici 2030, ont fait que la consommation du riz n'a cessé de croître à des taux beaucoup plus rapides, rendant les productions insuffisantes devant les demandes en consommation. Ce déficit des productions nationales (40 % de la consommation) est couvert par les importations (Seck et *al.*, 2013a). L'Afrique a importé en 2009 plus d'un tiers du volume de riz échangé sur le marché international, soit 10 millions de tonnes pour un coût s'élevant à plus de 4 milliards USD. Ce marché international est réputé pour son étroitesse, sa fragmentation en plusieurs variétés et types de riz imparfaitement substituables et sa forte instabilité. Le riz, aliment de base de la moitié de la population mondiale, est le produit le plus protégé et le plus subventionné au monde et son commerce ne porte que sur moins de 7 % de la production mondiale (Seck et *al.*, 2013b). C'est le continent asiatique qui produit 90% de la production mondiale de riz. Cette céréale n'est pas seulement un bien marchand ordinaire, elle est aussi et surtout une denrée politique en Asie. Les changements structurels dans les pays émergents asiatiques ne rassurent pas les prévisions du marché international, en raison de :

- la compétition accrue pour les facteurs de production terre, eau et main d'œuvre ;
- la perte de plus de 4 millions d'hectares de riz entre 1990 et 2005. Cette raréfaction des terres agricoles expliquent l'engagement des entreprises chinoises dans un processus d'acquisition des terres agricoles dans les pays en développement agricole, notamment en Afrique (Patricio, 2011).

Et, pourtant le continent africain regorge de fortes potentialités, à savoir :

- des bas-fonds propices à la riziculture estimés entre 138 et 238 millions d'hectares ;
- des terres arables potentielles estimées à 874 millions d'ha ;
- un potentiel en irrigation dans les bassins fluviaux estimé à 1.000.000 ha (Annie, 1995 ; Diagne et *al.*, 2013).

Le développement de la production rizicole en Afrique est devenu un sacerdoce pour les États africains. En Afrique de l'Ouest, on assiste à la course vers l'autosuffisance en riz, avec des programmes d'aménagements hydro agricoles, d'innovations de technologies agricoles et de

renforcement de toute la chaîne de valeur. Cette dynamique enclenchée après la crise du riz de 2007/2008, nécessite l'accompagnement d'une recherche soutenue qui anticipe sur les problèmes de productions, en développant de nouvelles stratégies d'adaptation durables.

En revanche, avec le phénomène des changements climatiques, la réalisation d'un taux d'accroissement durable de la productivité agricole devient de plus en plus un défi majeur. Pour une agriculture intelligente, face au climat, de nouvelles technologies innovantes doivent être mises à la disposition des producteurs, pour assurer une résilience et une adaptation des producteurs vulnérables aux effets du changement climatique. En production rizicole, les problèmes souvent rencontrés sont liés à :

- ✓ la salinisation des terres ;
- ✓ la perturbation des températures entraînant des périodes chaudes avec températures plus élevées et des périodes froides parfois plus longues dans certaines zones ;
- ✓ la toxicité ferreuse ;
- ✓ la sécheresse.

La salinisation des terres est provoquée par une concentration excessive des sels solubles dans le sol. Elle est souvent rencontrée dans les régions côtières, arides et semi-arides et fait partie des problèmes les plus sérieux qui entravent l'agriculture au niveau mondial.,

Plusieurs méthodes de lutte ont été développées pour récupérer les terres salées et stopper l'avancement de la salinisation, notamment par :

- o la recherche de variétés tolérantes
- o la construction de digues
- o l'amélioration des pratiques culturales telles que l'utilisation des amendements et la meilleure gestion de la lame d'eau.

La recherche de variétés tolérantes s'inscrit souvent dans un programme d'amélioration variétale. Le métier d'amélioration des plantes a commencé avec la sédentarisation des hommes, il y a plus de 10 000 ans. L'homme cultive les plantes pour son alimentation et pratique alors une sélection en choisissant, de manière empirique, de ressemer les plus belles graines des plantes intéressantes (GNIS, 2015). La sélection est de l'art et de la science pour améliorer l'héritabilité des plantes au bénéfice des hommes (Poehlman & Sleper, 1995). Le sélectionneur doit s'assurer que la variété qu'il essaie de produire sera cultivée par le producteur et convient aux attentes des consommateurs (Sié, 2009). La création de nouvelles variétés visant à combiner dans une seule variété les caractères identifiés dans les collections

de travail fait partie des thématiques de recherche les plus utilisées à nos jours pour apporter des solutions à cette contrainte (Chang, 1983).

Le développement de nouvelles variétés tolérantes passe par :

- une recherche de variétés avec un potentiel génétique de tolérance à la salinité,
- une maîtrise du fonctionnement de la plante en condition salée,
- un programme soutenu de développement de nouvelles lignées adaptées aux conditions locales.

Au Sénégal, les zones Sud, Centre et Nord sont concernées par la salinisation. Les stratégies développées en production rizicole concernent des constructions de digues anti-sel dans les zones Sud et le Centre ; des amendements de sol composés parfois de phosphogypse, tourteaux d'arachide et des drainages fréquents dans la zone irriguée. Le développement de nouvelles variétés tolérantes est encore à l'étape expérimentale au Sénégal et aucune variété tolérante n'est encore homologuée.

Dans le cadre du projet STRASA financé par la fondation Bill et Melinda Gates, AfricaRice, en partenariat avec les instituts de recherche africains, a réussi à sélectionner avec les producteurs et chercheurs des différentes zones agro écologiques, des variétés tolérantes à différents types de stress (salinité, froid, toxicité ferreuse). Au Sénégal, ISRA coordonne les activités de recherche de variétés tolérantes aux stress de salinité et de froid.

Pour répondre à cette problématique de salinité en production rizicole dans la vallée du fleuve Sénégal, un programme de développement de nouvelles variétés de riz tolérantes à la salinité et adaptées aux conditions de culture de la vallée a été mis en place. Le critère de tolérance au sel peut être défini comme « la production relative d'une plante cultivée pour un degré déterminé de salure de sol par comparaison avec son comportement sur un sol analogue, mais non salé » (UNESCO, 1952). L'évaluation de la tolérance aux sels sur la base de rendement relatif ne conduit pas nécessairement au même ordre de classement que l'appréciation sur la base de la survivance à de fortes doses de sel, mais fournit une base utilitaire de sélection des plantes à cultiver sur des sols modérément salés (Zhu, 2001). Cette présente étude s'inscrit dans le cadre du projet STRASA et a pour objectifs de sélectionner une base utilitaire de variétés de riz tolérantes à la salinité. Pour y arriver, 4 principales activités ont été identifiées :

1. Une sélection participative de variétés de riz tolérantes à la salinité au niveau des pays : Mali, Sénégal et Gambie ;

2. Une étude des effets du sel sur les variétés sélectionnées en milieu réel avec différents niveaux de salinité.
3. Un criblage des variétés sélectionnées avec différents niveaux de salinité conduit en serre durant la phase de développement végétatif des variétés
4. Une détermination des mécanismes physiologiques développés par les variétés pour s'adapter dans les différentes conditions de salinité.

La mise en œuvre de ces différentes activités permettra d'avoir une base utilitaire de sélection et de définir le schéma des premiers croisements.

CHAPITRE I

SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

Article soumis au journal Cahier d'agriculture le 12/08/2016

CHAPITRE I : RIZ ET SALINTE

I. IMPORTANCE DU RIZ

Le riz (*Oryza sativa* L.) est la culture la plus importante du monde du point des superficies emblavées et des populations concernées (Manneh, 2004). La production mondiale en 2014 est de 741,3 millions de tonnes de paddy sur une superficie de 164 millions d'hectares (FAO SMR, 2015). Les prévisions sur l'utilisation mondiale du riz en 2015 donnent 499,4 millions de tonnes de riz blanc. Plus de deux milliards de personnes en Asie prennent 60 à 70 % de leur apport énergétique sur le riz. Cette céréale constitue la source alimentaire la plus forte en croissance et revêt une importance capitale en matière de sécurité alimentaire en Afrique (FAO année internationale du riz, 2004).

Au niveau commercial, les flux commerciaux sont de 42,4 millions de tonnes de riz décortiqué en 2014 soit une augmentation de 14% par rapport à l'année précédente (FAO SMR, 2015). Le continent asiatique à lui seul contrôle 90% de la production et de l'offre d'exportation ce qui fait que le marché mondial subit une volatilité structurelle (Patricio, 2011). Les grands pays importateurs riz sont le Bangladesh, la Chine (continentale), l'Indonésie, la Malaisie, les Philippines, le Sri Lanka et les pays africains (Guinée, Kenya, Mozambique, Nigéria et Sénégal).

En Afrique, un recul des importations a été noté au niveau de quelques pays d'Afrique tels le Burkina Faso, la Côte d'Ivoire, le Ghana et l'Afrique du sud (FAO SMR, 2015).

Cependant la consommation du riz dans le continent a augmenté de 16 à 29 millions de tonnes entre 2000 et 2012 et en Afrique sub-saharienne de 12 à 24 Mt. En Afrique de l'Ouest, le taux annuel d'augmentation de la consommation de riz était de 5,4 % entre 2000 et 2012. Il est passé de 4,2 avant la crise de 2007 à 9,7 % entre 2007 et 2012. Entre 2010 et 2012 le rythme de consommation annuel était de 13,6 % (Seck *al.*, 2013b).

La consommation du riz en Afrique de l'Ouest croît beaucoup plus vite que la production locale (figure 1). De 1961 à 1975 les écarts entre la production et la consommation étaient faibles, c'est à partir des années de sécheresse qui ont entraîné le recul des productions des autres céréalières telles que le mil, le sorgho et le maïs, que la consommation du riz s'est imposée. Le gap entre la production et la consommation évolue depuis 2000 de 26% en temps normal jusqu'à 44% en période de crise (ex : 2007/2008). Entre 2008 et 2010, trois (3) pays

d'africains figuraient dans le top 10 des plus grands importateurs : Nigeria avec 1.800.000 tonnes (2^{ème} position), Côte d'Ivoire 1.000.000 tonnes (8^{ème} position) et le Sénégal 800.000 tonnes (10^{ème} position) (FAO, 2010).

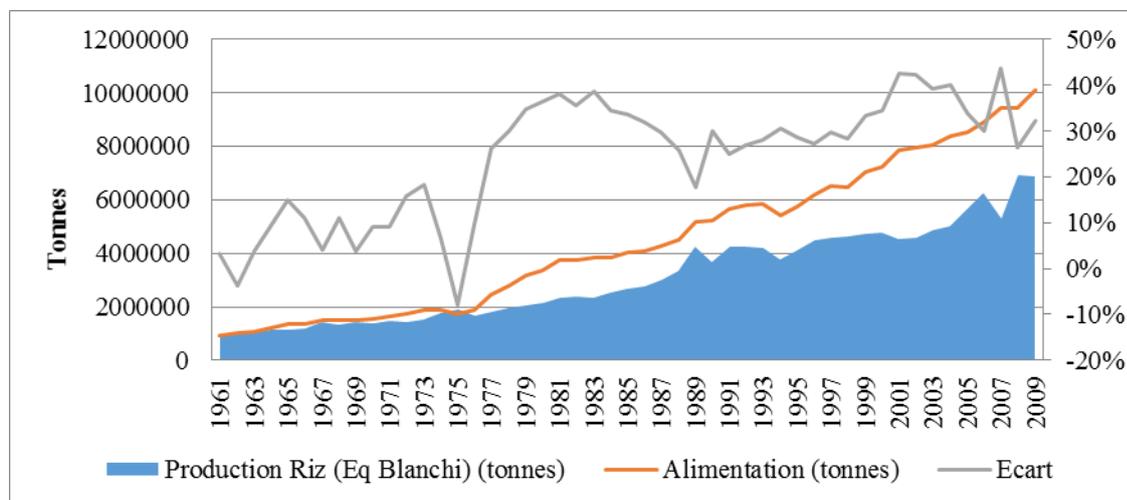


Figure 1: Evolution du gap entre la production locale et la consommation en Afrique de l'Ouest

Source (FAO, 2010), accédé en juin 2015

La production du riz a fortement évolué (Tableau 1) entre les années 1990 et 2000. Au Mali (2^{ème} producteur en Afrique de l'Ouest), la production est passée d'une moyenne de 516.770,5 tonnes dans les années 1990 à 1.070.049 de moyenne des années de 2000 à 2009 et de 2.305.612 tonnes en 2010 avec une consommation annuelle par habitant qui est passée de 11 à 54 kilos de 1961 à 2007 (FAO MAFAP SPAAA, 2013).

Le Sénégal a aussi connu une forte augmentation de la production entre 2000-2009 et 2010, avec une consommation annuelle par habitant de 90 kgs (FAO, 2012).

En Gambie, la production a triplé entre les années 2000-2009 et 2010, la consommation annuelle par habitant est de 117 kgs (AfricaRice, 2009).

Tableau 1 : Evolution des productions (en tonnes) de riz locale des années 1970 à 2010.

PAYS	1970-1979	1980-1989	1990-1999	2000-2009	2010
Gambie	28.298	28.791	19.433	31.790	99.890
Mali	186.460	204.538	516.770	1.070.049	2.305.612
Sénégal	95.415	129.485	172.480	258.850	604.043
TOTAL	310.174	362.814	708.684	1.360.689	3.009.545

Source FAOSTAT, accédé en juin 2015

En somme la consommation annuelle du riz blanc en Afrique Subsaharienne augmente à un taux de 5%, elle est estimée en 2020 à 36 Mt (Seck et *al.*, 2013b).

II. SYSTEME DE PRODUCTION DU RIZ

La domestication du riz s'est faite de manière indépendante en Chine, en Inde et en Indonésie avec 3 races de riz *sinica* (appelé aussi *japonica*), *indica* et *javanica* (appelé aussi *bulu* en Indonésie). En Chine, des découvertes archéologiques ont montré que le riz *indica* était cultivé à Ho-mu-tu, dans la province de Chekiang il y a au moins 7000 ans. En Inde, le riz était cultivé entre 1500 et 2000 avant J.C et en Indonésie vers 1648 avant J.C (Chang, 1983).

Les systèmes de culture du riz se distinguent suivant la source de l'alimentation hydrique de culture. Le système pluvial moins intensif (l'eau devient le premier facteur limitant le rendement) renferme les zones agro-écologies de plateau, bas-fond et mangrove. Le système irrigué avec une maîtrise de l'eau est plus intensif et mécanisé.

En plateau pluvial, la terre est préparée et ensemencée à sec, souvent peu fertile et les rendements sont très faibles, les rizières sont arrosées par l'eau de pluie sans stagnation. Différents types cultures sont pratiqués :

- La culture itinérante: un système primitif dans lequel, les terres forestières sont défrichées, plantées en riz pendant deux ou trois ans puis abandonnées. Après plusieurs années de jachère, les agriculteurs peuvent revenir et recommencer un autre cycle.
- La monoculture du riz : culture d'une seule espèce végétale d'une saison à l'autre sur la même parcelle.
- La culture intercalaire : Plutôt que de cultiver uniquement du riz pluvial, il peut être plus avantageux de l'intercaler avec des légumineuses comme le haricot, le niébé ou l'arachide.
- La culture en couloir : consiste à intercaler du riz avec des légumineuses arbustives. L'intervalle entre les rangées de légumineuses varie entre 2 et 5 mètres. Le riz est semé dans les couloirs. Les haies sont taillées à 60 cm lorsqu'elles deviennent suffisamment grandes, le produit de la taille est souvent incorporé dans le sol entre les lignes de riz servant ainsi d'engrais vert.
- Les cultures associées: culture simultanée de deux ou trois espèces végétales dans un même champ en lignes ou séries de lignes alternées.

- La culture de relais: culture successive de deux ou plusieurs espèces. L'espèce suivante est plantée avant la récolte mais après la floraison de l'espèce précédente.
- La culture mixte: culture simultanée de deux ou plusieurs espèces dans le même champ sans répartition en lignes distinctes.

Pour ce qui est de culture pluviale en bas fond, les rizières sont alimentées par les eaux de pluie ou par le ruissellement de l'eau qui est en permanence retenue par des diguettes. Généralement la monoculture est employée mais certaines associations culturales avec des espèces qui supportent la stagnation de l'eau comme certaines variétés de sorgho sont possibles.

Le riz cultivé est dans une zone agro-écologie irrigué (maîtrise de l'irrigation avec une meilleure gestion de la lame) est plus intensif : une mécanisation plus poussée, une terre très bien préparée avec un semis en humide avec des semences pré-germées à la volée ou en pépinière suivi d'un repiquage, une forte utilisation des engrais et des herbicides. La monoculture est souvent pratiquée et dans certaines zones le riz est cultivé deux ou trois fois l'année dans la même parcelle (FAO, 1997).

L'Afrique a connu une très longue histoire de production rizicole. La domestication des espèces de riz africain date de plus de 3000 *ans* avant JC. Durant la colonisation, les portugais avaient introduit l'espèce asiatique au XVI siècle et la bande côtière de l'Afrique de l'Ouest se nommait « Côte de riz ». Cinq systèmes de production de riz sont distingués (Saito et *al.*, 2013) :

- Pluvial plateau : les parcelles généralement non délimitées sont très rarement inondées dans certains cas (Uganda) une irrigation d'appoint est ajoutée.
- Pluvial bas fond : les parcelles parfois délimitées suivant la topo-séquence dans les vallées intérieures, sont inondées par les pluies et les eaux souterraines. Le pluvial bas fond peut évoluer vers le système irrigué avec de légers aménagements permettant d'améliorer la gestion de l'eau.
- Irrigué : les parcelles sont bien délimitées, et l'irrigation peut assurer deux cultures par an.
- Eau profonde : Ce système se rencontre souvent le long des fleuves et des zones côtières humides avec une profondeur de l'eau de 3 mètres. Le riz est flottant et la culture peut durer 5 mois.

- Mangrove : il s'agit de marécages situés sur les estuaires à proximité de la mer. Le riz est souvent cultivé pendant la période où les inondations d'eau douce lavent la terre et déplacent les courants de marée. Les variétés de grande taille, adaptées aux crues et tolérantes à la salinité sont souvent cultivées.

La distribution la plus récente de ces systèmes de production en Afrique est faite par Diagne et *al.*, en 2013 sur la figure 2 suivante :

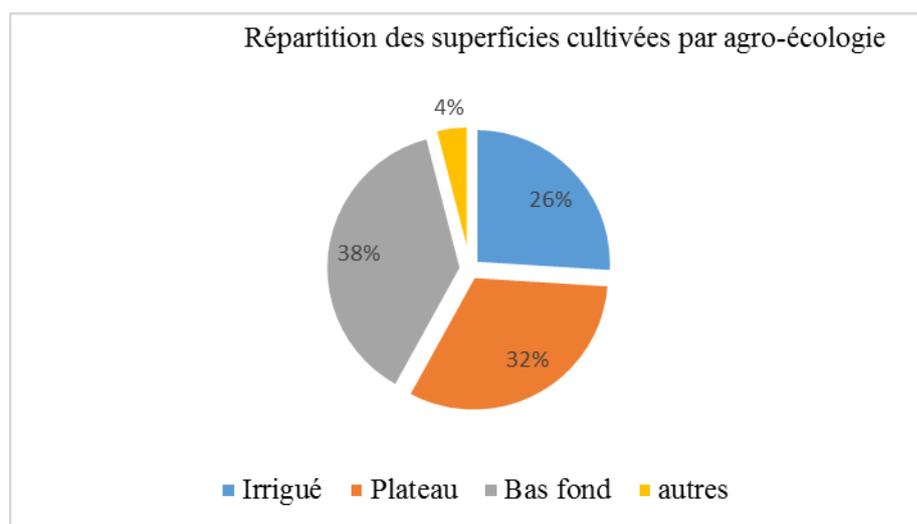


Figure 2 : Répartition superficies cultivées en Afrique par agro-écologie

Données source : Diagne A., 2013

Au niveau des 3 pays couverts par le projet STRASA, la répartition de ces systèmes se présente comme indique dans le tableau 2 suivant :

Tableau 2 : Répartition des superficies en hectares des systèmes de production dans 3 pays de STRASA Afrique Ouest

Pays	Irrigué	Bas fond	Plateau	Autres
Mali	335 269	134 851	174 747	-
Gambie	27 916	25 231	19 350	7 013
Sénégal	94 185	43 948	36 178	-
TOTAL	457 370	204 030	230 275	7 013

Données source : Diagne A., 2013

III. LES CONTRAINTES A LA PRODUCTION DU RIZ

La productivité du riz évolue suivant les environnements de culture. Le rendement peut passer à moins d'une tonne à l'hectare en pluvial à plus de 9t/ha en système irrigué. Pour améliorer la productivité du riz par unité de surface, il est nécessaire de comprendre tous les facteurs qui limitent le rendement au niveau de la parcelle paysanne afin de prévoir des stratégies pour son amélioration (Saito et *al.*, 2013). En Afrique Subsaharienne, il existe encore de gaps importants entre le rendement actuel des producteurs au niveau champ pendant la saison et le rendement maximal qu'il serait possible d'atteindre en améliorant les pratiques de gestion culturale (Diagne et *al.*, 2013). Le rendement potentiel est le rendement d'un cultivar cultivé dans des environnements adaptés sans limite d'alimentation hydrique et minérale avec une gestion efficace des ravageurs, maladies, mauvaises herbes et des autres contraintes. Ce rendement maximum peut être déterminé par des modèles de simulations avec des hypothèses physiologiques et agronomiques plausibles dans des environnements déterminés (Evans & Fischer, 1999). En Afrique il est difficile de valider un rendement potentiel à partir d'un modèle de simulation, la disponibilité des données météorologiques à long terme fait souvent défaut. D'autres types de rendements sont utilisés:

- Rendement maximum obtenu avec de bonnes pratiques culturales en expérimentation
- Rendement maximum obtenu dans les meilleures parcelles paysannes
- Rendement moyen des producteurs

Généralement le rendement des producteurs ne dépasse pas 80% du rendement potentiel estimé par simulation d'un modèle (Saito et *al.*, 2013 ; Miezán et *al.*, 1999). Le gap de rendement (figure 3) est ainsi défini comme étant la différence entre le rendement potentiel et la moyenne obtenue dans la parcelle du producteur (Becker et *al.*, 2003).

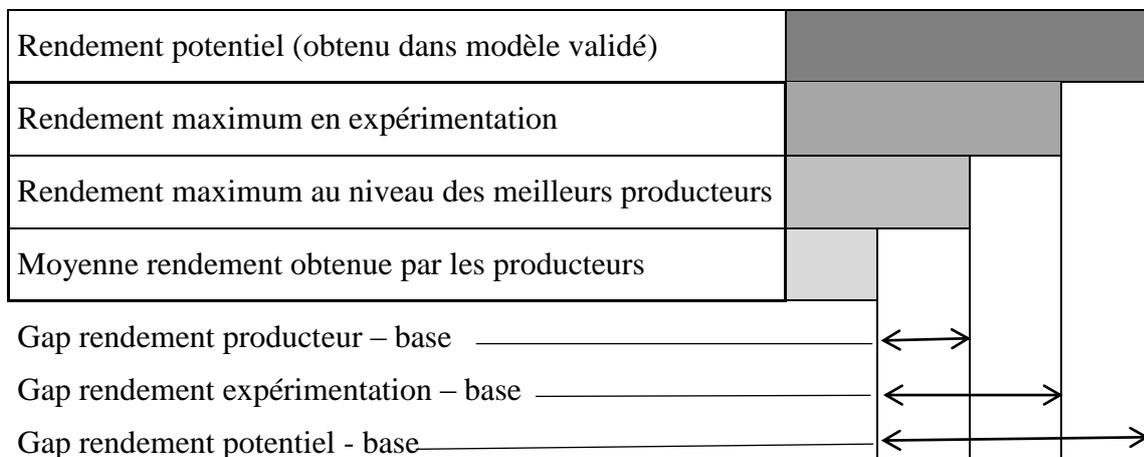


Figure 3 : Répartition des gaps de rendement

Source (Saito et *al.*, 2013) adapté de Lobell et *al.*, 2009

La diminution de ces écarts de rendement exige l'adoption de bonnes pratiques ou un investissement sur les aménagements. Pour déterminer sur quel facteur il serait nécessaire d'agir, il faut une bonne compréhension des contraintes à la productivité :

- les facteurs limitant le rendement ou contraintes abiotiques : sécheresse ou excès d'eau, salinité, toxicité ferreuse, températures extrêmes, carences en nutriments
- les facteurs réduisant le rendement ou contraintes biotiques : les adventices, les rongeurs, termites et oiseaux, les insectes ravageurs, et des maladies fongique, bactérienne et virale (Saito et *al.*, 2013).

Les contraintes abiotiques sont dues aux facteurs climatiques, l'eau et le sol. La température, le rayonnement solaire et le vent sont des facteurs climatiques qui influencent plus le rendement du riz par leurs effets sur la croissance du plant et sur le processus physiologique de formation des grains. Les contraintes liées à l'eau sont le maintien de l'humidité du sol pour une bonne gestion des nutriments, des adventices, des insectes ravageurs. Au niveau du sol ; l'érosion, la carence en nutriments, les sols toxiques et défavorables (salinité) sont les contraintes les plus sévères (FAO Guide d'identification des contraintes de terrain à la production du riz, 2003).

IV. SALINITE

Les terres émergées ont été estimées à 13,5 milliards d'ha (Nahon, 2008), avec le retrait des déserts, les hautes montagnes ; l'Antarctique, le Groenland, les superficies cultivables ne sont qu'à 3 milliards d'ha. Près de la moitié de cette dernière superficie est déjà cultivée. Les prévisions du doublement de la population mondiale étant à court terme, la sauvegarde du capital sol devient ainsi une priorité, il est inextensible et menacé (Legros, 2009).

Généralement le terme salinité au sens strict inclut tous les problèmes qui sont dus aux sels présents dans le sol. Cependant, selon Singh & PBGB (FIREMAN & BLAIR, 1949), trois types de salinité sont distingués :

- Les sols sodiques (alcalins) sont caractérisés par une faible teneur en sels solubles, un pourcentage Na⁺ échangeables ESP élevé ≥ 15 et dégradation de la structure des sols.
- Les sols salins sont toujours dominés par les cations de sodium avec une conductivité électrique de plus de 4 déci-Siemens par mètre, les anions dominants sont généralement du chlore et du sulfate solubles. Les valeurs du ph et SAR sont beaucoup plus faibles que dans les sols sodiques
- Les sols sodique-alcalin ont à la fois de grandes valeurs de ESP et CE.

Plus de 6,2 % des terres émergées, soit environ 837 millions d'hectares, sont affectées par la salinité (Fischer et *al.*, 2002). Cette superficie est composée de : 48 % de sol salin et 52 % sol sodique (Bot et *al.*, 2000).

La salinisation des terres fait partie des problèmes majeurs du monde, les superficies affectées sont estimées 397,1 millions d'ha (sol salin) 434 millions (sol sodique) (FAO soil portail consulté ce 08 juin 2015).

La salinité fait perdre en agriculture près de 12 milliards USD annuellement et ce montant augmente en fonction du niveau élevé de la salinité (Ghassemi, et *al.*, 1995).

En Afrique on note 38.7 million ha de sol soit 2% et 33.5 millions d'ha de sol sodique (33.5%). Le monde perd au moins 3 ha de terres arables chaque minute à cause de la salinité du sol (IPTRID, 2006).

La salinité des sols fait partie des contraintes les plus sévères affectant la productivité des cultures (Zhu, 2001). Elle est atteinte quand la teneur des sels solubles est *élevée* (Mark, 2008).

La salinisation (sodiques et salins) se produit naturellement sur les sites de faible altitude dans les régions semi-aride à arides (Bot, et *al.*, 2000).

La concentration en sel est donnée par le TDS (Quantité Totale de Matière Dissoutes) exprimé en mg de sel par litre d'eau (mg/L) ou en gramme de sel par mètre cube d'eau (mg/L = g/m³ = ppm). La concentration en sel peut aussi être mesurée grâce à la conductivité électrique de l'eau d'irrigation (ECi). La conductivité électrique est exprimée en millimhos par centimètre (mmhos/ cm) ou deciSiemens par mètre (dS/m) ou microSiemens par centimètre. La relation entre la concentration en sel (C) et la conductivité électrique (CE) est approximativement: $C = 640 CE$. Un sol peut être défini comme salé si la conductivité électrique est supérieure ou égale à 4 dS/m (environ 40 mM NaCl) (Viswanathan, 2005).

Les stratégies de lutte contre la salinité sont généralement classées en deux (PITMAN & LÄUCHLI, 2002):

- en génie civil en agissant sur les aménagements (irrigation et drainage) ou sur le sol (amendements)
- en sélection avec la recherche de variétés tolérantes à la salinité.

V. MECANISMES DE TOLERANCE A LA SALINITE

La salinité fait partie des facteurs limitant sévèrement la production des céréales notamment le riz (Singh et al., 2008). Les plantes réagissent différemment à la salinité suivant leurs différents stades de développement. Au niveau des céréales, le riz (*Oryza sativa* L.) est le plus sensible et l'Orge (*Hordeum vulgare*) le plus tolérant (Rana & Mark, 2008).

Le riz réagit différemment à la salinité suivant les stades de développement

- Diminution de la croissance des plantules (Amirjani, 2010 ; Thiaka, 1988)
- En floraison : réduction de la photosynthèse, augmentation du nombre épillets vides (Munns & Termaat, 1986 ; Asch et al., 2000 ; Amirjani, 2010)
- À la phase reproductive : le nombre de talles fertiles, le poids des grains et le nombre de grains remplis diminuent (Asch et al., 2000)

La plante est très tolérante à la germination, peu sensible aux stades de tallage et maturation mais très sensible en phase plantule et stade reproduction (Laffitte et al., 2004)

En effet c'est depuis les années 50 et 60, que des recherches avaient montré qu'en milieu contrôlé les effets du sel sur le riz sont dus à un déséquilibre des échanges osmotiques et l'accumulation des ions de chlore (Iwaki & Ogo, 1953) et (Shimose, 1963). Des études plus récentes ont montré que les concentrations excessives des ions sodium (Na^+) et de chlore, sont tolérées par la plante dans une large gamme (Clarkson & Hanson, 1980). En 1981, Devitt et collaborateurs ont démontré que la variation du ratio Na^+/K^+ affecte le rendement en grains (Devitt, et al., 1981). Les mécanismes typiques de tolérance à la salinité du riz sont liés à l'expulsion ou à la réduction des ions Na^+ et l'augmentation des ions K^+ pour maintenir un bon ratio Na^+/K^+ au niveau des tiges (Gregorio, et al., 1997)

Les réactions des plantes à la salinité sont généralement dues au faible potentiel osmotique de la solution du sol et au niveau élevé de toxicité du sodium (et du chlore pour certaines espèces) provoquant ainsi des perturbations multiples sur le métabolisme, la croissance et le développement des plantes aux niveaux moléculaire, biochimique et physiologique (Hanana et al., 2011)

Les mécanismes de tolérance à la salinité peuvent être répartis en trois groupes :

- Ajustement ionique : La rentrée des ions sodium dans les vacuoles à de fortes concentrations peut entraîner un besoin d'augmenter de la pression osmotique des autres compartiments cellulaires afin de maintenir le volume (Amtmann & Leigh, 2010). Quoique la synthèse et l'accumulation de composés solubles compatibles

contribue au maintien de la croissance cellulaire en conditions de stress ionique, les plantes ont développé d'autres moyens non moins efficaces tels que l'ajustement ionique afin de réduire et d'équilibrer la concentration d'ions dans le but d'ajuster la pression osmotique au niveau du cytoplasme (Sairam & Tyagi, 2004 ; Shabala & Cuin, 2007).

- Exclusion des ions toxiques : L'autre stratégie permettant aux plantes de survivre en condition de stress salin consiste à exclure le sodium du cytoplasme vers l'extérieur de la cellule. Dans ce cas, les plantes limitent l'entrée des éléments salins et les rejettent dans le compartiment apoplasmique (Blumwald *et al.*, 2004) ; (Munns, 2005). La plante évite ainsi leur accumulation à des concentrations toxiques dans les feuilles. Une défaillance de cette exclusion entraîne une toxicité au niveau des feuilles les plus âgées qui meurent prématurément après quelques jours ou semaines selon l'espèce (Munns & Tester, 2008).
- La compartimentation vacuolaire : celle-ci consiste à évacuer du cytoplasme les ions Na^+ en excès vers la vacuole afin d'éviter leur effet toxique et inhibiteur à l'encontre des processus enzymatiques (Flowers, *et al.*, 1977). Cette action nécessite un cloisonnement de Na^+ et Cl^- au niveau cellulaire et intracellulaire pour éviter les concentrations toxiques dans le cytoplasme en particulier dans les cellules de mésophile de la feuille (Munns & Tester, 2008).

Chez la variété de riz Nona Boroka, les mécanismes tels que l'évitement de l'entrée de Na^+ dans les parties aériennes, l'accumulation de Na^+ dans les gaines et le maintien de la croissance, ont été mis en évidence (Le Quang, 2004).

VI. SÉLECTION VARIÉTALE POUR LA TOLÉRANCE DU RIZ A LA SALINITE

La sélection variétale fait partie des stratégies de lutte contre la salinité les plus utilisées. De la sélection conventionnelle à l'utilisation des derniers outils de la biotechnologie, des variétés adaptées sont souvent développées pour permettre la production de riz en condition de salinité.

6.1 Sélection conventionnelle

Les méthodes de sélection conventionnelle telles que : hybridation, mutation, « shuttle breeding » (sélection par navette) ont permis de créer les premières variétés de riz tolérantes à la salinité à partir des variétés traditionnelles tolérantes. Les variétés CSR 10, CSR 13, CSR23, CSR27, CSR30, CSR36, PSBRc48, PSBRc86, PSBRc88 et NSIC Rc106 ont été

développées avec des lignées recombinantes (Gregorio, et *al.*, 2002). Dans le cadre du projet STRASA quatre variétés ont été homologuées pour leur tolérance à la salinité dans l'écologie de mangrove en Gambie et Sierra Leone avec l'approche PVS (Sélection Variétale Participative): War 73-1-M2-1 et WAR 77-3-2-2 (Manneh, Report STRASA, 2014).

6.2 Les approches récentes de sélection

6.2.1 Variation somaclonale

POKKALI est une variété de riz traditionnelle qui se développe dans les zones de l'Etat du Kerala en Inde. Elle est très tolérante à la salinité, grande de taille, de faible tallage, sensible à la verse, péricarpe rouge avec une qualité du grain pas appréciable. La variété a été soumise en culture cellulaires pour l'induction de variation somaclonale. Une des variétés obtenue TCCP 266-2-49-B-B-3 a présenté des caractéristiques plus intéressantes : tolérance à la salinité, péricarpe blanc, meilleure qualité du grain et le rendement s'est amélioré (IRRI, 2015). Les variétés mères NONABORKA, I Kong Pao, Srimalaysia I ont aussi été utilisées avec cette approche pour développer des populations évaluées au Sénégal, Côte d'Ivoire et Maroc (Bouharmont, 1991).

6.2.2 La culture des anthères

La première variété de riz tolérante à la salinité développée par cette approche avec indica x indica en IRRI (International Rice Research Institute) a été homologuée aux Philippines en 1995 est IR51500-AC11-1 sous le nom de PSBRc50 « Bicol » (Senadhiraa et *al.*, 2002). La Corée du Sud, dans le cadre du projet KAFACI (Korea - Africa Food and Agriculture Cooperative Initiative) est entrain de caractériser des variétés obtenues avec le croisement des sous espèces japonica et indica par la culture des anthères pour le rendement et la tolérance aux stress abiotiques (KAFACI, 2015).

6.2.3 Utilisation des marqueurs moléculaires

L'utilisation des marqueurs en sélection a permis d'améliorer la rapidité et l'efficacité des programmes de sélection. L'identification du QTL (Quantitative Trait Loci) *saltol*, responsable du caractère de tolérance à la salinité au stade plantule dans le chromosome 1 du riz, a fait beaucoup avancer la sélection variétale (Gregorio et *al.*, 2002). D'autres QTL ont été ainsi détectés dans cette même région : QNa pour l'absorption des Na⁺ (Flowers et *al.*, 2000), QTL pour absorption Na⁺, concentration des K⁺ et Na/K (Koyama et *al.*, 2001), SKC1 ou OsHKT8, RNTQ1, SDS1 (Lin et *al.*, 2004), transport Na⁺ et Cl⁻ dans la tige

(Ammar, 2004), qST1 (Lee et *al.*, 2006). Des QTL ont été aussi découverts au niveau des chromosomes 3, 4, 10 et 12 (Gregorio, 1997), chromosomes 4, 6 et 9 (Flowers et *al.*, 2000).

L'utilisation des marqueurs moléculaires a ainsi révolutionné la sélection variétale notamment celle du riz sur les stress abiotiques de façon générale.

VII. DISCUSSIONS ET CONCLUSIONS

La consommation du riz en Afrique devient de plus en plus importante et les productions locales peinent à satisfaire la demande. Les importations de riz sont encore importantes pour résorber l'écart entre la production locale et la demande en consommation (FAO, 2010). Depuis la crise rizicole de 2007/2008, beaucoup de stratégies de développement du secteur rizicole en Afrique ont été initiées (Seck et *al.*, 2013). Au Sénégal, le programme national d'autosuffisance en riz s'est fixé un objectif de production de 1,6 million de tonnes de paddy à l'horizon 2017 pour satisfaire toute la demande en riz des Sénégalais . Le système de production rizicole sénégalais est composé d'une écologie pluviale (bas-fond et plateau) et celle irriguée. Les projections d'emblavures de superficies rizicoles en pluvial dans les zones du Centre, Sud et Sud-Est sont de 183.000 ha pour une production de 640.500 tonnes en 2017 tandis qu'en zone irriguée (vallée du Fleuve et Anambé) 960.002 tonnes sont attendues avec près de 95 % provenant de la vallée du Fleuve (MAER, 2014). L'intensification de la riziculture dans la vallée du Fleuve Sénégal, reste confrontée à des contraintes : biotiques, abiotiques, d'ordre technique et socioéconomiques. La salinité des sols fait partie des contraintes abiotiques les plus importantes dans les zones de delta et de la moyenne vallée, elle est inhérente à leur pédogenèse. Malgré les efforts consentis, la dégradation des terres par la salinisation et l'acidification reste un défi majeur pour le développement des zones affectées. Le riz développe différentes stratégies de résistance à la salinité suivant ses stades de développement. L'identification des variétés de riz ayant une tolérance à la salinité serait d'un grand profit pour la production rizicole dans la vallée du Fleuve Sénégal.,

L'évaluation de variétés de riz pour la tolérance aux sels sur la base de rendement relatif ne conduit pas nécessairement au même ordre de classement que l'appréciation sur la base de la survivance à de fortes doses de sel, mais fournit une base utilitaire de sélection des plantes à cultiver sur des sols modérément salés (UNESCO, 1952). Pour créer de nouvelles variétés tolérantes à la salinité il faut une bonne compréhension des mécanismes agro morphologique et physiologique développés par la plante suivant les stades de développement, et utiliser les outils de biologie moléculaire afin d'identifier les régions du chromosome qui portent cette

information. Cette revue des états des connaissances sur le riz et la salinité permet de sortir des thématiques de recherches importantes sur :

- les approches participatives de sélection variétale
- l'étude des effets du sel sur les variétés en milieu réel durant le cycle complet de reproduction avec différents niveaux de salinité
- le criblage des variétés dans différents niveaux maîtrisés durant la phase de développement végétatif afin de déterminer les réactions agro morphologiques des différentes variétés
- l'étude des mécanismes physiologiques basés sur la composition en sodium et potassium (Na^+ et K^+) au niveau des racines et des parties aériennes

Un programme d'amélioration des plantes requiert des stratégies et des approches pour répondre à un besoin parfois spécifique de la population en créant des variétés d'un rendement accru, d'une meilleure qualité et résistance aux ravageurs ou maladies. La création de nouvelles variétés améliorées augmente ainsi la valeur intrinsèque et commerciale des cultures ainsi une protection de ces dernières peut revêtir une importance économique certaine. L'amélioration de l'adoption des nouvelles variétés par les producteurs et consommateurs passe certainement par une démarche participative qui intègre les critères de sélection variétale des consommateurs et producteurs. Combiner une sélection participative et une caractérisation DHS/VATE (Distinction Homogénéité Stabilité / Valeur Agronomique Technologique et Environnementale) pour un enregistrement des nouvelles variétés s'avère être une nouvelle approche qui répond aux soucis de l'harmonisation des lois semencières dans les zones de CEDEAO – UEMOA – CILSS. En effet la mise en place de catalogues des variétés au niveau national puis régional demande une caractérisation DHS/VATE commune avec une implication des compagnies agricoles ou semencières. Cette nouvelle approche de sélection et caractérisation participatives peut protéger et faire mieux adopter les nouvelles variétés et dure 3 ans.

- Première année : il s'agit d'essai préliminaire de rendement participatif. Des lignées avancées de l'essai précédant d'observation, les premiers tests de rendement sont effectués en invitant les producteurs aux choix des variétés. Dans une situation de double culture l'essai peut être conduit deux fois (hivernage et contre saison). Une visite des producteurs et de toute l'équipe de recherche permettra d'apprécier les caractères agronomiques et de productivité des variétés qui seront combinés avec l'exploitation statistiques pour avancer une dizaine de lignées. Des renseignements sur

les critères de choix variétal seront également fournis pour une meilleure intégration dans les prochains programmes.

- Deux ans de caractérisation DHS/VATE :
 - o Les essais DHS gérés directement dans les stations de recherche pour déterminer les caractéristiques obligatoires du protocole DHS de l'UPOV (voir Tableau 3). Les essais VATE seront conduits avec les compagnies semencières dans leur propre site. Elles vont ainsi participer à la sélection finale des meilleures variétés à proposer à l'homologation en notant les performances de chaque variété.

Dans les zones de double culture l'essai DHS/VATE sera conduit 4 fois (2 contre saisons et 2 hivernages) accompagné d'une production de semences de sélection de G0 à G2 pour préparer assez de stock pour produire des pré-bases G3 dès l'homologation des nouvelles variétés.

Tableau 3 : Fiche de caractérisation DHS

jours après semis	<u>Observations DHS</u>		Note
40	Feuille:pigmentation anthocyanique de la collerette	absente	1
VG (a)		présente	9
60	Dernière feuille: port du limbe (observation précoce)	dressé	1
VG		demi- dressé	3
		horizontal	5
		recourbé	7
90	Dernière feuille: port du limbe (observation tardive)	dressé	1
VG		demi- dressé	3
		horizontal	5
		recourbé	7
55	Époque d'épiaison (50% des plantes avec des panicules)	très précoce	1
VG		précoce	3
		moyenne	5
		tardive	7
		très tardif	9
65.	Glumelle inférieure: pigmentation anthocyanique de l'apex (observation précoce)	absente ou très faible	1
VS		faible	3
		moyenne	5
		forte	7
		très forte	9
65.	Épillet: couleur du stigmaté	blanc	1
VS		vert clair	2
		jaune	3
		violet clair	4
		violet	5
70	Variétés non rampantes seulement: Tige: longueur (panicule non comprise)	très courte	1
VS		courte	3
		moyenne	5
		longue	7
		très longue	9
70	Tige: pigmentation anthocyanique des nœuds	absente	1
VS		présente	9

Jours après semis	Observations DHS		Note
72-90	Panicule: longueur de l'axe central	court	3
MS		moyen	5
		long	7
70-80	Panicule: répartition des arêtes	au sommet seulement	1
VS		sur le quart supérieur seulement	2
		sur la moitié supérieure seulement	3
		sur les trois quarts supérieurs seulement	4
		sur toute la longueur	5
60-80	Épillet: pubescence de la glumelle inférieure	absente ou très faible	1
VS		faible	3
		moyenne	5
		forte	7
		très forte	9
90	Panicule: courbure de l'axe central	droite	1
VG		semi-droite	2
		retombante	3
		déclinante	4
90	Panicule: port des ramifications	dressé	1
VS		demi- dressé	3
		étalé	5
92	Caryopse: longueur	court	3
MS		moyen	5
		long	7
92	Caryopse: forme (de profil)	arrondi	1
VS		semi-round	2
		demi- fusiforme	3
		fusiforme	4
		très fusiforme	5
92	Pericarpe : couleur	blanc	1
VS		brun clair	2
		brun panaché	3
		brun foncé	4
		rouge clair	5
		rouge	6
		pourpre panaché	7
		pourpre	8
		pourpre foncé/noir	9
92	Caryopse: arôme	absent ou très faible	1
MG		faible	2
		fort	3
MG	Mensuration unique d'un ensemble de plantes ou de parties de plantes		
MS	Mensuration d'un certain nombre de plantes isolées ou de parties de plantes		
VG	Évaluation visuelle fondée sur une seule observation faite sur un ensemble de plantes ou de parties de plantes		
VS	Évaluation visuelle fondée sur l'observation d'un certain nombre de plantes isolées ou de parties de plantes		
(a)	Sauf indication contraire, toutes les observations portant sur la feuille doivent être effectuées sur l'avant-dernière feuille		

CHAPITRE II

EVALUATION PARTICIPATIVE DE VARIETES DE RIZ DANS LES ZONES SALEES DU SENEGAL, MALI ET DE LA GAMBIE

Article soumis et accepté à TROPICULTURA le 12/11/2016

CHAPITRE II : EVALUATION PARTICIPATIVE DE VARIETES DE RIZ DANS LES ZONES SALEES DU SENEGAL, MALI ET DE LA GAMBIE

I. INTRODUCTION

En Afrique Subsaharienne, le riz fait de plus en plus partie des céréales les plus consommées : en Gambie, la consommation annuelle par tête d'habitant est de 117 kg, au Sénégal 90 kg et au Mali 81,61 Kg (FAO, 2013). Entre 2000 et 2012, le taux d'augmentation annuelle de la consommation du riz était de 5%. Considérant ce taux et tous les autres paramètres influençant la demande intacts, la consommation du riz dans cette partie de l'Afrique devrait augmenter de 24 Mt en 2012 à 36 Mt en 2020. La production en 2020 dans cette partie de l'Afrique serait de 19 Mt de riz blanc et entraînerait un besoin d'importation de 17 Mt (Seck et *al.*, 2013b). Pour faire face à cette situation, les gouvernements africains ont développé des stratégies pour renverser cette tendance malgré les contraintes abiotiques liées aux changements climatiques. La salinité fait partie des problèmes importants qui affectent l'agriculture au niveau mondial, on prévoit dans les prochaines décennies qu'elle fera partie des problèmes les plus sérieux qui entravent les productions végétales (FAO, 2015). Généralement, le terme « salinité » au sens strict inclut tous les problèmes qui sont dus aux sels présents dans le sol. Cependant, trois types de salinité (FAO Soil portail, 2015 ; Ghassemi et *al.*, 1995) sont distingués :

- les sols sodiques (alcalins) sont caractérisés par une faible teneur en sels solubles, un taux de sodium échangeable ESP élevé ≥ 15 et une dégradation de la structure des sols. ESP exprime le taux de saturation du complexe absorbant en sodium échangeable par rapport à tous autres cations échangeables ;
- les sols salins sont toujours dominés par les cations de sodium avec une conductivité électrique de plus de 4 déci-Siemens par mètre, les anions dominants sont généralement du chlore et du sulfate solubles. Les valeurs du pH et SAR sont beaucoup plus faibles que dans les sols sodiques ;
- les sols sodique-alcalin ont à la fois de grandes valeurs de ESP et CE.

Plus de 6,2 % des terres émergées, soit environ 837 millions d'hectares, sont affectées par la salinité (Ghassemi et *al.*, 1995). Cette superficie est composée de 48 % de sol salin et 52 % sol sodique (Bot et *al.*, 2000). Le monde perd au moins 3 ha de terres arables chaque minute à

cause de la salinité du sol (IFPRID, 2006). Cette perte est encore estimée à près de 12 billions USD annuellement et ce montant augmente en fonction du niveau élevé de la salinité (Ghassemi et *al.*, 1995).

La salinité fait partie des facteurs limitant sévèrement la production des céréales, notamment le riz (Singh et *al.*, 2008 ; Diaw, 2000). Les plantes réagissent différemment à la salinité suivant leurs différents stades de développement.

Le riz réagit différemment à la salinité suivant les stades de développement :

- diminution de la croissance des plantules (Amirjani, 2010) ;
- en floraison, on note une réduction de la photosynthèse et une augmentation du nombre d'épillets vides (Laffitte, 2004) ;
- à la phase reproductive, le nombre de talles fertile, le poids des grains et le nombre de grains remplis diminuent (Asch et *al.*, 2000).

La plante est très tolérante au stade de germination, peu sensible aux stades de tallage et maturation, mais très sensible en phase plantule et stade reproduction (Koyama et *al.*, 2001)

Les mécanismes de tolérance à la salinité peuvent être répartis en trois groupes :

- Ajustement ionique : la rentrée des ions sodium dans les vacuoles à de fortes concentrations peut entraîner un besoin d'augmenter la pression osmotique des autres compartiments cellulaires, afin de maintenir le volume (Atmann et Leigh, 2010). Quoique la synthèse et l'accumulation de composés solubles compatibles contribuent au maintien de la croissance cellulaire en conditions de stress ionique, les plantes ont développé d'autres moyens non moins efficaces tels que l'ajustement ionique afin de réduire et d'équilibrer la concentration d'ions dans le but d'ajuster la pression osmotique au niveau du cytoplasme (Munns et Tester, 2008 ; Senadhiraa et *al.*, 2002) ;
- Exclusion des ions toxiques : l'autre stratégie permettant aux plantes de survivre en condition de stress salin consiste à exclure le sodium du cytoplasme vers l'extérieur de la cellule. Dans ce cas, les plantes limitent l'entrée des éléments salins et les rejettent dans le compartiment apoplasmique (Blumwald et *al.*, 2004 ; Munns et Termaat, 1986). La plante évite ainsi leur accumulation à des concentrations toxiques dans les feuilles. Une défaillance de cette exclusion entraîne une toxicité au niveau des feuilles les plus âgées qui meurent prématurément après quelques jours ou semaines selon l'espèce (Rana et Mark, 2008) ;

- La compartimentation vacuolaire : celle-ci consiste à évacuer du cytoplasme les ions Na^+ en excès vers la vacuole, afin d'éviter leur effet toxique et inhibiteur à l'encontre des processus enzymatiques (Flowers et *al.*, 1977). Cette action nécessite un cloisonnement de Na^+ et Cl^-
- parties aériennes, l'accumulation de Na^+ dans les gaines et le maintien de la croissance ont été mis en évidence (Chinnusamy et *al.*, 2005).

Pour lever cette contrainte de la salinité, AfricaRice et l'IRRI, en partenariats avec 12 pays d'Afrique, conduisent le projet STRASA (Stress Tolerant Rice for Africa and South Asia) depuis 2008. Un des objectifs de ce projet est de développer et diffuser des variétés tolérantes au stress abiotique. L'approche choisie pour mettre à la disposition des producteurs des variétés de riz tolérantes à la salinité est la Sélection Variétale Participative (SPV). Cette approche permet d'améliorer le taux d'adoption des variétés au niveau des producteurs en impliquant ces derniers dans les premières étapes de sélection. En effet, l'objectif principal d'un programme de sélection doit être de faire adopter les variétés homologuées par les producteurs.

Durant la phase I de ce projet (2008-2010) en 2009, les activités de SPV (première année) ont été conduites en Afrique de l'Ouest dans trois pays Sénégal, Mali et Gambie (AfricaRice, 2009). Il s'agissait d'essais de criblage de variétés dans des conditions de stress salinité. L'objectif principal était de permettre aux paysans de choisir, parmi une gamme de nouvelles lignées/variétés mises en condition de stress de salinité, celles perçues comme les mieux adaptées à leurs propres champs et avec des caractéristiques agronomiques appropriées à leurs activités culturales.

Dans ce chapitre, la méthodologie utilisée sera décrite, avant de la présentation des résultats et les discussions.

II. MATERIEL ET METHODES

Approche de Sélection Variétale Participative

La sélection variétale participative est une approche d'amélioration variétale développée par AfricaRice qui s'organise autour des lignées avancées en fixité, des variétés diffusées et des variétés locales. La stratégie fondamentale a été d'impliquer activement les producteurs et d'autres acteurs dans la recherche et le développement de riz. Elle dure 3 ans, en première année, une pépinière d'observation ou un essai de criblage avec un nombre de variétés

compris entre 30 et 100, est installé pour permettre aux producteurs et les différents chercheurs de l'équipe de visiter une à trois fois (en phase végétative, reproduction et maturité) l'essai afin d'apprécier les caractères agronomiques et de productivité des variétés. En années deux et trois, les variétés choisies (une dizaine) seront en tests multi locaux (mother trials) et en essais paysans (entièrement conduits par le paysan avec 3 variétés pour chacun) (Sié et *al.*, 2009). Cette présente étude concerne le criblage en année une de la sélection variétale participative.

Sites : Les essais ont été installés au Mali, en Gambie et au Sénégal.,

- Au Mali, trois essais ont été conduits dans la zone de production rizicole de l'Office du Niger du Cercle de Niono situé entre les latitudes 13°30 et 15°45 et les longitudes 50°5 et 6°35 dans la région de Ségou durant l'hivernage 2009. Le Cercle de Niono présente un relief plat dans l'ensemble, avec des sols brun rouge constitués de dunes arasées et de plaines sablonneuses des sols hydromorphes à gley. Le climat est de type sahélien avec des précipitations en moyenne de 425 mm. Les ressources en eau sont constituées principalement des « falas » (ancien lit du fleuve Niger) de Molodo, de Boh et Néman, (Mérieau, 2001 ; Ndiaye et Guindo 1998). Les trois essais sont installés dans les fermes N9, N1 (casier de RETAIL) et la ferme semencière du casier de Kolodougou.
- En Gambie, l'essai a été conduit à Kaiaf (Lower River Region), village situé à 170 km de Banjul entre 13°24'00'' Nord, 15°37'00'' Ouest (AfricaRice, 2009). La pluviométrie moyenne est de 800 mm sur la moitié Ouest du pays et de 700 mm sur à l'Est. La pauvreté du sol, en raison de l'intrusion de sel, l'acidité, la sécheresse et la non-disponibilité de variétés améliorées à haut rendement sont quelques-unes des principales contraintes de la mangrove pour la production de riz en Gambie. Sous climats très contrastés, quand la salinité de l'eau dépasse celle de l'eau de mer ; la mangrove est souvent rabougrie et son étendue, réduite aux dépens de zones nues, sursalées (Marius, 1985).
- Au Sénégal, l'essai a été installé dans la station expérimentale de recherche de l'Institut Sénégalais de Recherches Agricoles (ISRA) du Centre de Recherches Agricoles de Saint Louis situé à 16°14'N, 16°14'W dans le village de Ndiol dans la zone du Delta de la vallée du Fleuve Sénégal. Cette partie du Sénégal se caractérise par une saison des pluies de Juillet à Septembre avec une moyenne de 220 mm, un climat chaud et humide avec une humidité relative très élevée et des températures qui

oscillent entre 23 °C et 35°C. Le sol de type « Hollaldé » est caractérisé par une forte teneur en argile comprise entre 50 à 75 % avec une bonne capacité de rétention en eau.

Matériel végétal :

Dans chaque site, le matériel utilisé est constitué de 40 variétés dont 36 à évaluer et 4 témoins composés d'une variété locale choisie au niveau de chaque pays, 2 témoins reconnus pour leur tolérance à la salinité au niveau international et 1 témoin sensible (Tableau 4). Excepté la variété témoin local, toutes les variétés ont été livrées par AfricaRice siège Cotonou avec plus de 60% du matériel venant de l'IRRI.

Tableau 4 : Liste des variétés et leur généalogie

N°	Variétés	Généalogie
1	IR 4630 (témoin tolérant)	PELITA I-1/POKKALI (ACC 8948)//IR 2061-464-2//IR 1820-52-2
2	FL478 (témoin tolérant)	FL478
3	POKKALI (Témoin tolérant)	POKKALI
4	IR 29 (Témoin sensible)	IR 1561-149-1//IR 1737//IR 833-6-2-1-1
5	IR 76346-B-B-10-1-1-1	IRRI 126//IR 65195-3B-13-2-3 (PSB RC 86)
6	IR 67067-2B-8-2	KHAO DAWK MALI 105//IR 53519-26-4-2-1-3//IR 11141-6-1-4
7	IR 31247-3B-8-2-1	IR 54/WELI HANDIRAN//OM 1630-108-2
8	IR 72593-B-3-2-3-5	IR 20//IR 24//IR 65195-3B-13-2-3 (PSB RC 86)
9	IR 72593-B-3-2-3-8	IR 20//IR 24//IR 65195-3B-13-2-3 (PSB RC 86)
10	IR 72593-B-3-2-2-2-B	IR 20//IR 24//IR 65195-3B-13-2-3 (PSB RC 86)
11	IR 72046-B-R-1-1-2-1-B	IR 31142-14-1-1-3-2*2//IR 31406-333-1
12	IR 73571-3B-11-2	AGAMI MI//IR 68003-45-2-2
13	WAS 174-B-1-1	IR 4630-22-2//IR 67418-238-6-2-3-3
14	IR 65192-4B-11-3	IR 9884-54-3-1E-P1 (PSB RC 48)//KUATIK PUTIH
15	WAS 174-B-10	IR 4630-22-2//IR 67418-238-6-2-3-3
16	IR 59418-7B-21-3	IR 31375-3-3-1-1//GETU (ACC 17041)//IR 10198-66-2
17	CSR 89 IR 15	IR 4630-22-2-5-1-3//NONA BOKRA//DAMODAR//IR 9764-45-2-2
18	IR 76393-2B-7-1	IR 71657-5R-B-12 PB//IRRI 126
19	WAS 174-B-1-14	IR 4630-22-2//IR 67418-238-6-2-3-3
20	IR 71991-3R-2-6-1	IR 5//IRRI 126
21	IR 66946-3R-178-1-1	IR 29//POKKALI B
22	IKONG PAO	IKONG PAO
23	ROHYB 6	CCA/RH 2
24	IR 61920-3B-22-2-1 (NSIC RC 106)	IR 32429-47-3-2//WAGWAG
25	ECIA 31-6066 (Sahel 210)	IR 1529-430//IR 759-54-2-2-2
26	IR 72593-B-3-2-1-2-B	IR 20//IR 24//IR 65195-3B-13-2-3 (PSB RC 86)
27	IR 66401-2B-6-1-3	IR 10206-29-2-1//IR 29337-36-3
28	WAS 73-B-B-253-2	IR 4630-22-2//IR 31785-58-1-2-3-3
29	IR 71895-3R-60-3-1	IR 55182-3B-14-3-2//IR 65185-3B-8-3-2 (PSB RC 84)
30	IR 72593-B-3-2-3-14	IR 20//IR 24//IR 65195-3B-13-2-3 (PSB RC 86)
31	IR 1829-3R-89-1-1	IR 1366-120-3-1//IR 1539-111
32	WAS 191-7-WAB-1-WAS-1	TOG 5681/4*IR 64//IR 64//IR 64
33	IR 61247-3B-8-2-1	BG 367-4//AT 401
34	IR 64419-3B-13-1	TCCP 266-2-49-B-B-3*2//IR 68
35	WAS 73-B-B-231-4	IR 4630-22-2//IR 31785-58-1-2-3-3
36	WAS 201-B-2	WAS 201
37	D 14	D 14
38	BW 293-2 (SAHEL 201)	IR 2071-586//BG 400-1-SLR
39	NSIC RC 106	IR 32429-47-3-2//WAGWAG
40	SAHEL 108 (Témoin local Sénégal)	IR 30 (BPH S)//BABAWEE//IR 36
41	ROK 5 (Témoin local Gambie)	SR 26 B//WELLINGTON SEL
42	RP KN 2 (Témoin local Mali)	JERAK//IR 8

Généalogie - source (BMS 3.0.8, 2015)

Dispositif expérimental :

Le dispositif expérimental utilisé était un « Augmented design » dans chaque site. Il est composé d'une seule répétition avec 6 blocs au niveau de chaque site. Chaque bloc contenait 10 parcelles élémentaires avec 6 variétés à évaluer et 4 témoins (une variété dans chaque parcelle). Les témoins sont répétés dans chaque bloc sous forme d'un dispositif de Fischer.

Le dispositif augmenté est recommandé quand le nombre de variétés à tester est élevé et la quantité de semences ne permettant pas de faire une répétition (Federer & Raghavarao, 1975). Les variétés testées sont comparées à des témoins qui possèdent assez de semence pour une répétition.

Conduite culturale :

Les plants ont été repiqués dans tous les sites après une pépinière d'une 20 de jours (début tallage). Chaque parcelle élémentaire contenait 5 lignes de 5 mètres chacune et les plants repiqués avec un espacement de 20 cm entre deux lignes et 20 cm entre deux pieds.

Au Mali et au Sénégal, les doses de fertilisation minérale recommandées sont composées de N-P avec respectivement de 120 – 20 et 128 – 28, apportées sous forme d'urée (46%N) et de DAP (18% N et 46% P).

Visite animée

Une visite guidée avec les producteurs permettant de choisir les variétés les plus performantes a été organisée dans chaque site. Au Mali, deux visites animées ont été organisées dans chaque site aux stades de l'épiaison et de la maturité pour apprécier, avec les producteurs les performances des différentes variétés.

La première visite avait pour objectif de voir l'évolution des variétés durant leur phase végétative : l'aspect phénotypique, le tallage et la hauteur et de se faire une première opinion avant la maturité. Avec la deuxième visite, les variétés les plus performantes répondant aux critères des producteurs ont été choisies. Les participants ont été aussi soumis à un questionnaire d'évaluation (fiche 1). Ainsi 30 personnes ont été invitées à raison de 10 par village. Les responsables du service conseil rural de l'Office du Niger (zone de Niono) ont également participé à cette visite.

Fiche 1 : Enquêtes

1. Nom du paysan : _____
2. Age: _____
3. Sexe: _____
4. Village (origine): _____
5. Connaissance de la salinité : Oui Non
6. Si oui, quels sont les symptômes : _____
7. Avez-vous la salinité dans votre champ? Oui Non
8. Quels sont les pratiques culturales que vous utilisez pour éviter cette contrainte ? _____
9. Date de visite : _____
10. Quelles variétés de riz aimeriez-vous planter dans votre exploitation et pourquoi ?

Variété (numéro)	Raisons du choix	Explications plus détaillées	Score

11. Quelles variétés de riz, selon vous, ne sont pas performantes ou quelles variétés ne souhaitez-vous pas semer dans votre exploitation et pourquoi ?

Variété (numéro)	Raisons pourquoi vous n'aimez pas ces variétés	Explications plus détaillées

En Gambie, la visite animée de l'essai KAIAP a concerné 24 producteurs afin de dégager les meilleures variétés et les critères déterminants.

Au Sénégal, la visite commentée a été organisée à Ndiol. Cent trente-trois producteurs et productrices représentant les GIE et autres organisations paysannes de Saint Louis à Kassack ont participé à la sélection des variétés tolérantes à la salinité. Les partenaires Africa-Rice station sahel de Saint Louis, SAED, DR/DR et ANCAR ont été bien représentés.

Caractérisation de la salinité

Mali

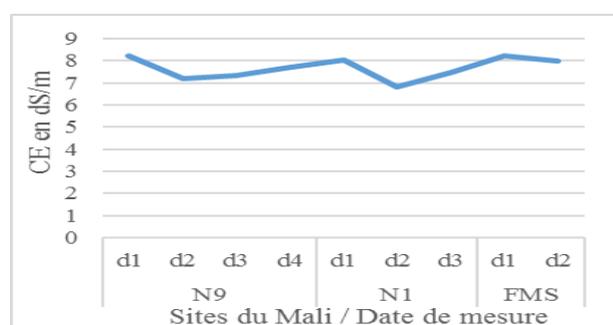


Figure 4: Evolution du Ph sites du Mali

Les mesures de pH et de CE (figures 4 et 5) , effectuées 9 fois à partir du 25 ème jour après repiquage, sont illustrées dans le tableau N°1 en annexe II. La conductivité électrique très faible et la variation du pH un peu élevé montrent une tendance des sols à une alcalinisation. En effet, au niveau de l'Office du Niger, la contrainte salinité se manifeste sous forme d'une alcalinisation / sodisation plutôt qu'une salinisation proprement dite, (Ndiaye et Guindo, 1998). Ce phénomène qui a pris naissance avec les aménagements hydro-agricoles a entraîné une destruction des propriétés physico-chimiques des sols.

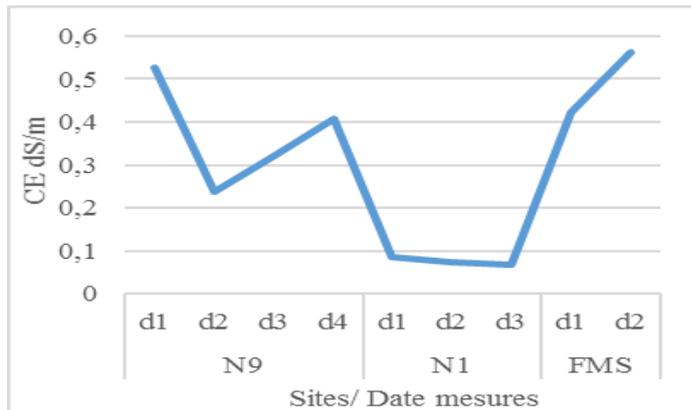


Figure 5: Evolution CE sites du Mali

Gambie

La conductivité électrique n'a pas été mesurée à KAI AF. Cette zone de mangrove est caractérisée par une pauvreté du sol en raison de l'intrusion du sel, l'acidité et la sécheresse.

Sénégal

Le choix de la parcelle a été fait suivant les résultats des analyses de la salinité des échantillons de sol du site. Le niveau de salinité du sol était assez hétérogène et variait entre 17,5 dS/m et 3,98 dS/m. Finalement le site a été retenu pour installer l'essai avec une pré-irrigation pour atténuer la salinité jusqu'à 3 dS/m et l'homogénéiser. La salinité a été suivie par parcelle hebdomadairement en mesurant la conductivité électrique (CE) de l'eau d'irrigation. Un appareil de conductimètre électrique a été utilisé pour les mesures de salinité (CE) et de pH. L'appareil a deux électrodes permettant d'effectuer des mesures de Ph et de CE. A Ndiol, les mesures de salinité se faisaient deux fois par semaine avant drainage et après irrigation. Douze mesures par parcelles ont été effectuées, la moyenne de CE des parcelles avant l'installation de l'essai était de 7,06 dS/m (Figure 6).

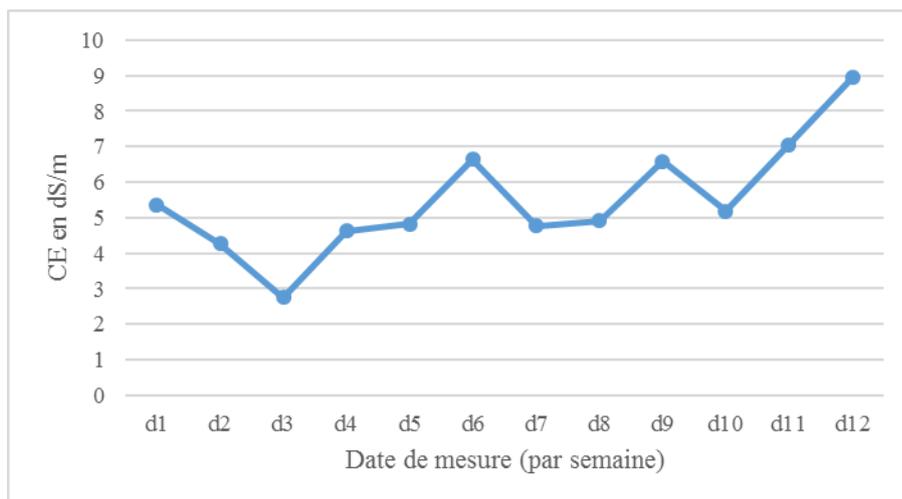


Figure 6: Evolution de CE Ndiol (Sénégal)

Paramètres agronomiques

Les paramètres agronomiques étudiés sont le rendement (Rendt) en Kg/ha ; la hauteur (HM) en cm du sol à la dernière feuille paniculaire au stade maturité et le nombre de talles (TM) par plant à la récolte. Les données ont été managées avec le « Breeding Management System » et les analyses des interactions génotypes et environnements effectuées avec le « Breeding View ». Au niveau de chaque site, les moyennes des paramètres des variétés testées ont été comparées aux 5 références (tolérants, sensibles et une variété locale).

Quant aux observations et mesures, elles ont été effectuées conformément au manuel SES de IRRI et concernent (IRRI, 1996) :

- Nombre moyen de talles : TM ;
- Hauteur moyenne des plantes à maturité : HM ;
- Le taux de stérilité : pourcentage de grains vides : Ster ;
- Poids de mille grains : PMG ;
- Rendement : Rendt ;
- Mesures de conductivité électrique : CE ;
- Notation effet du sel « scoring ».

III. RESULTATS

Visites guidées

Mali

Une visite animée dans l'ensemble des sites a permis aux producteurs de choisir les trois meilleures variétés en donnant des raisons pour expliquer leur choix (Tableau 5). Les trois meilleures variétés choisies sont : Was 73-B-B-231-4 ; IR 76346-B-B-10-1-1-1 et IR 72593-B-3-2-3-8. Les critères qui ont permis aux producteurs de choisir ces variétés sont :

- Le bon tallage;
- La bonne épiaison;
- Le niveau faible des dégâts d'oiseaux;
- Le cycle court;
- Le rendement.

Tableau 5 : Variétés choisies par les producteurs au Mali

N°	Variété	Rang	Raisons du choix
V1	Was 73-B-B-231-4	1 ^{ère}	Résistant au sel; bon tallage; bonne épiaison; panicules longues bon rendement ; cycle court.
V17	IR 76346-B-B-10-1-1-1	2 ^{ème}	Résistant au sel; bon tallage; bonne épiaison; panicules longues ; cycle court.
V14	IR 72593-B-3-2-3-8	3 ^{ème}	Résistant au sel; bon tallage; bonne épiaison; bon rendement pas de verse ; cette variété n'est pas attaquée par les oiseaux et grain blanc.

Source (AfricaRice, Sénégal, Mali and Gambie, 2009)

Gambie

En Gambie, les producteurs de la zone de KAI AF ont visité l'essai au stade maturité et choisi les variétés qui répondaient à leurs critères (Tableau 6).

Tableau 6 : Variétés choisies par les producteurs en Gambie

Variétés	Rang	Raisons du choix
IR 76346-B-B-10-1-1-1	1 ^{ère}	Charge panicule, vigueur, hauteur, bonne charge de la panicule, précoce
IR 65192-4B-11-3	2 ^{ème}	Précoce, bonne charge panicule
IR 61247-3B-8-2-1	3 ^{ème}	Vigueur, précoce
IR 72593-B-3-2-3-14	4 ^{ème}	Précoce

Les critères de choix des variétés exprimés par les producteurs sont :

- La vigueur ;
- La hauteur entre 90 et 120 cm pour éviter la submersion et faciliter la récolte manuelle ;

- La charge de la panicule (nombre de grains) ;
- Le cycle court.

Les producteurs du Mali et de la Gambie ont un choix variétal commun sur IR 76346-B-B-10-1-1-1.

Sénégal

La visite animée des producteurs dans le site de Ndiol a permis de sélectionner quatre variétés les mieux appréciées par les producteurs (tableau 7). Parmi les critères de choix variétal dégagés par les producteurs on note :

- La précocité ;
- Le tallage ;
- La charge de la panicule en grains ;
- La forme du grain (long et fin).

La variété WAS 73-B-B-231-4 a été choisie aussi par les producteurs des trois sites du Mali.

Tableau 7 : Variétés choisies par les producteurs – Site de Ndiol

Variétés	Nombre de fois sélectionné	Raisons du Choix
D14	1 ^{ere}	Bonne épiaison - bon tallage - bonne vigueur - panicule chargée - grains lourds bien remplis
IR 72593-B-3-2-1-2-B	2 ^{ème}	Bonne épiaison - bon tallage - épis bien fournis - port gros
WAS 73-B-B-231-4	3 ^{ème}	Bon tallage - bonne épiaison - taille moyenne - bonne qualité des grains pas de brisures - des grains très fins
IR 59418-7B-21-3	4 ^{ème}	Bonne épiaison - bon tallage - peu attaqué par les oiseaux - pas de verse -bonne charge de l'épi

Résultats agronomiques analysés

- **Le nombre de talles moyen (TM)**

L'évolution du TM est influencée significativement par l'interaction des géotypes et des sites (Pr<0,001). Le TM des variétés entre les trois sites du Mali ne se distingue pas de façon significative, la plus petite différence significative étant de 9 talles par plant. Au Sénégal, le tallage moyen des variétés est significativement le plus important avec près de 25 talles par plant en moyenne contre 7 talles/plant en Gambie (voir tableau 9).

Au Mali, sur le site N1, 10 variétés testées se sont mieux adaptées en tallage que le meilleur témoin tolérant POKKALI avec un nombre de talles variant entre 21 et 16 par plant. Quant au

site N9, 13 variétés ont une expression en tallage plus importante que POKKALI (meilleur témoin dans ce site), le nombre de talles par plant de ces variétés varie entre 23 et 16. Dans le dernier site du Mali (FMS), trois variétés ont développé des performances meilleures que la variété locale (meilleur témoin) avec un tallage compris entre 18 et 17.

Au Sénégal, la variété IR 29, supposée sensible à l'effet du sel, a développé le meilleur tallage parmi les témoins. Parmi les 36 variétés, 16 se sont distinguées par leur tallage avec des performances meilleures que les témoins. Le nombre de talles de cette classe de variétés varient entre 39 et 27 par plant.

En zone de mangrove (Gambie), deux variétés seulement sont avec la variété locale (témoin) dans la meilleure classe avec 12 talles par plant. Le témoin tolérant à la salinité IR4630 est à 9 talles par plant.

- **La Hauteur moyenne (HM)**

L'analyse de l'interaction des variétés (génotypes) et sites (environnements) révèle un effet hautement significatif sur l'évolution de la hauteur des plants ($Pr < 0,001$). Les hauteurs moyennes des variétés dans les trois sites du Mali sont significativement les plus grandes avec 102 ; 109 et 107 cm respectivement au niveau de FMS, N1 et N9 que dans les deux autres sites. Au Sénégal, la croissance des plantes semble plus affectée avec une moyenne de 64 cm contre 78 cm en Gambie (Tableau 8).

:

Tableau 8 Moyennes nombre moyen de talles (TM)

Genotypes	FM S	Class e	Gambi e	Class e	N1	Class e	N9	Class e	Sénégal	Classe	Moyenn e	Class e
BW 293-2 (Sahel 201)			12	2	14,7	17	23	1	27	13	19,175	1
CSR-89IR15	12,3	28,5			8	37,5	13	32	38,6	1	17,975	5
D14	12,7	27			12	32	13	32	20,6	33	14,575	25
ECIA 31-6066 (Sahel 210)	15	10	10	4,5	14,5	18	13	32	21,8	28,5	14,86	21
FL 478	12,2	30	6	15	17,5	6	15,1	18	31,5	7	16,46	11,5
IKP	15,4	8	4	28,5	15,8	14	12,8	34	23,4	25	14,28	29
IR 1829-3R-89-1-1	14	16	9	6,5	20,9	1	11	36,5	20,8	32	15,14	20
IR 29	12,8	26	7	11	11,1	34	11	36,5	25,7	17	13,52	36
IR 31247-3B-8-2-1	7,8	39	5	22,5	12,4	28	6	39	25,4	19,5	11,32	40
IR 4630 (Tolérant)	8,6	37	9	6,5	16	12,5	15,7	15	17,1	38	13,28	38
IR 59418-7B-21-3	11,8	31	6	15	16	12,5	15,7	15	19,4	35	13,78	34
IR 61247-3B-8-2-1	14	16	5	22,5	12	32	17,3	6	32	6	16,06	14
IR 61920-3B-22-2-1	13,9	18			12,3	29	12,4	35	28,8	9	16,85	9
IR 64419-3B-13-3	16,3	5	5	22,5					27,9	10	16,4	13
IR 65192-4B-11-3	14	16	8	9	14	21,5	7,3	38	25,1	21	13,68	35
IR 66401-2B-6-1-3	14,6	12	5	22,5	12,5	26,5	13,1	30	26,9	14,5	14,42	27
IR 66946-3R-178-1-1	13	23,5	5	22,5	13,7	23	13,6	29	21,3	30	13,32	37
IR 67076-2B-8-2	13,4	20	6	15	12	32	17,1	8	27,5	12	15,2	19
IR 71895-3R-60-3-1	17,5	2	5	22,5	19,4	2	14,7	23,5	27,7	11	16,86	8
IR 71991-3R-2-6-1	15	10	8	9	12,2	30	16,1	10	21,8	28,5	14,62	24
IR 72046-B-R-1-1-2-1-B	12,9	25	6	15	12,5	26,5	14	26	25,4	19,5	14,16	30,5
IR 72593-B-3-2-1-2-B	18	1	6	15	14,2	20	17,4	3,5	37,5	2	18,62	2
IR 72593-B-3-2-2-2-B	13,2	21,5	6	15	13,3	25	15,8	13	22,3	27	14,12	32
IR 72593-B-3-2-3-14	16,7	3,5	4	28,5	14	21,5	17,3	6	36,7	3	17,74	6
IR 72593-B-3-2-3-5	13	23,5	10	4,5	17,6	5	14,7	23,5	18,1	36,5	14,68	22
IR 72593-B-3-2-3-8	14,2	14	12	2	15,6	15	15	20,5	16,4	39	14,64	23
IR 73571-3B-11-2	10	34	6	15	15,4	16	14	26	23,9	23	13,86	33
IR 76346-B-B-10-1-11	14,5	13	4	28,5	19,1	3	18,1	2	23,8	24	15,9	16
IR 76393-2B-7-1-13-1	16	7	5	22,5	9,6	36	16	11,5	33	4	15,92	15
NSIC RC 106	16,2	6	5	22,5	7,2	39	15,7	15	26,7	16	14,16	30,5
POKKALI (Tolérant)	9,2	36	8	9	16,2	11	15	20,5	11,1	40	11,9	39
ROHYB 6	13,2	21,5	4	28,5	17,4	7	15	20,5	32,7	5	16,46	11,5
Témoin local	16,7	3,5	12	2	8	37,5	15,5	17	19,5	34	14,34	28
WAS 174-B-1-1	10,1	33			10,5	35	13,9	28	23,3	26	14,45	26
WAS 174-B-1-10	9,9	35			17	8	16,5	9	18,1	36,5	15,375	18
WAS 174-B-1-14	11,7	32			14,3	19	16	11,5	24	22	16,5	10
WAS 191-7-WAB-1-WAS-1	12,3	28,5			16,8	9	17,3	6	26,9	14,5	18,325	4
WAS 201-B-2	15	10			16,4	10	17,4	3,5	25,5	18	18,575	3
WAS 73-B-B-231-4	7,9	38			18,3	4	14	26	30,4	8	17,65	7
WAS 73-B-B-253-2	13,7	19			13,5	24	15	20,5	21,2	31	15,85	17
Moyenne	13,3		6,76		14,2		14,7		25,2			
Probabilité (Génotype x Sites)											<0.001	
Probabilité (Génotype)											0,514	

o Mali

La croissance des plantes dans les trois sites du Mali ne semble pas très affectée. Dans le site N1, la variété IR 31247-3B-8-2-1 occupe à elle seule la première classe avec 153 cm suivi du meilleur témoin POKKALI. Au niveau de FMS, les variétés évaluées ne sont pas plus performantes en hauteur que le meilleur témoin (POKKALI). Les variétés IR 31247-3B-8-2-1 et IR 72046-B-R-1-1-2-1-B ont les plus grandes hauteurs avec 152 et 139 cm suivies de IR 29 (témoin).

o **Sénégal**

Onze variétés ont développé une hauteur variant entre 71 et 101 cm, plus grande que celle du meilleur témoin (variété locale). Les deux témoins supposés tolérants aux conditions de salinité ont une hauteur de 50 cm.

o **Gambie**

La hauteur des variétés varie entre un maximum de 106 (témoin IR4630) et un minimum de 65 cm avec une moyenne de 78 cm. La Sahel 201 a la plus grande hauteur parmi les variétés testées.

- **Le rendement (Kg/ha)**

L'interaction génotype x environnement a un effet significatif sur la variation du rendement dans les cinq sites ($Pr < 0,001$). Les trois sites du Mali ont les rendements les plus élevés avec des moyennes de 4152 ; 3890 et 3970 Kg/ha respectivement à FMS, N1 et N9. Au Sénégal, le rendement moyen est de 2627 kg/ha avec un maximum de 5625 kg/ha. En Gambie, les rendements sont plus faibles avec une moyenne de 988 kg/h et un maximum de 2105 kg/ha (Tableau 9).

Tableau 9 : Moyennes Rendement (Kg / ha)

Genotypes	FMS	Classe	Gambie	Classe	N1	Classe	N9	Classe	Sénégal	Classe	Moyenne	Classe
WAS 174-B-1-10	2311	39			2988	32	3541	27	1469	29	2577	33
FL 478	2549	38	1251	8	3015	31	2556	36	3312	10	2537	34
WAS 174-B-1-1	2555	37			2753	35	3632	25	2844	15	2946	26
IR 4630 (Tolérant)	2614	36	2105	1	2686	37	2523	37			2482	36
ROHYB 6	2732	35	1130	13	5552	2	5286	5	2969	13,5	3534	12
CSR-89IR15	3050	34			2824	34	3840	22			3238	19
WAS 174-B-1-14	3077	33			3050	30	3500	28	1562	28	2798	30
IR 29	3251	32	870	19	2732	36	2326	38	5625	1	2961	25
POKKALI (Tolérant)	3351	31	1795	4	3368	26	3884	20	4000	5	3280	18
IR 59418-7B-21-3	3381	30	912	17	4262	13	4347	13	5219	2	3624	9
IR 73571-3B-11-2	3425	29	340	28	3645	21	2756	35	1375	33	2308	38
IR 72593-B-3-2-2-2-B	3818	28	638	20	2977	33	3831	23	1375	33	2528	35
IR 65192-4B-11-3	3832	27	1269	6	3808	17	5111	7	2688	17	3341	16
WAS 191-7-WAB-1-WAS-1	3917	26			3639	22	4226	14	2563	18	3586	10
IR 61920-3B-22-2-1	4262	25			6344	1	5379	3	3906	8	4973	1
IR 31247-3B-8-2-1	4321	24	406	26	3146	28	1608	39	1438	30	2183	40
IR 66946-3R-178-1-1	4380	23	1278	5	4313	12	5052	9	3125	12	3630	8
IR 76346-B-B-10-1-11	4392	22	1969	3	4454	10	3286	29	1313	34	3083	24
IKP	4423	21	298	29			2884	32	1719	27	2331	37
WAS 73-B-B-231-4	4429	20			3853	16	6287	1	3750	9	4580	2
IR 71991-3R-2-6-1	4433	19	1221	10	3566	24	5372	4	2250	20	3368	15
IR 72593-B-3-2-3-5	4460	18	1097	14	3970	15	3121	31	2063	23	2942	27
IR 67076-2B-8-2	4476	17	1174	11	3599	23	2882	33	2063	23	2839	29
IR 72593-B-3-2-3-8	4506	16	1223	9	3565	25	3914	19	2781	16	3198	21
WAS 73-B-B-253-2	4508	15			3213	27	3188	30	1875	25	3196	22
IR 1829-3R-89-1-1	4547	14	899	18	5023	5	4826	11	3938	7	3847	6
IR 72593-B-3-2-1-2-B	4607	13	580	23	3731	20	3624	26	5188	3	3546	11
IR 72046-B-R-1-1-2-1-B	4688	12	629	21	3145	29	2771	34	2219	21	2690	32
IR 76393-2B-7-1-13-1	4701	11	1252	7	4728	9	3804	24	3938	7	3684	7
IR 71895-3R-60-3-1	4760	10	430	25	4204	14	3849	21	1250	35	2899	28
NSIC RC 106	4797	9	292	30	2445	38	3942	18	2500	19	2795	31
WAS 201-B-2	4858	8			4805	8	5256	6	3250	11	4542	4
Témoin local	4901	7	2005	2	3790	18	5570	2	844	38	3422	13
IR 72593-B-3-2-3-14	4934	6	970	15	5280	4	3982	17	5063	4	4046	5
IR 61247-3B-8-2-1	4998	5	594	22	5357	3	4624	12	969	37	3308	17
IR 66401-2B-6-1-3	5039	4	1134	12	4395	11	4947	10	1406	31	3384	14
IR 64419-3B-13-3	5166	3	398	27					1125	36	2230	39
ECIA 31-6066 (Sahel 210)	5284	2	920	16	3783	19	4219	15	1813	26	3204	20
D14	6208	1			4966	6	4060	16	2969	14	4551	3
BW 293-2 (Sahel 201)			558	24	4854	7	5062	8	2063	23	3134	23
Moyenne	4152		988		3890		3971		2627			
Probabilité (Genotype x Sites)											<0.001	
Probabilité (Genotype)											0.0077	

o Mali

Dans le premier site (FMS), les rendements les plus élevés sont obtenus avec six variétés : D14 ; ECIA 31-6066 (Sahel 210); IR 64419-3B-13-3; IR 66401-2B-6-1-3; IR 61247-3B-8-2-1 et IR 72593-B-3-2-3-14, variant entre 4933 et 6208 kg/ha. La variété locale a le meilleur rendement des témoins avec 4901 kg/ha. Quant au site N9, la variété WAS 73-B-B-231-4 s'adapte mieux avec 6287 kg/ha, suivi du meilleur témoin (variété locale). Dans le troisième site N1 ; 17 variétés testées ont des rendements variant de 5552 à 6343 kg/ha et le meilleur témoin est encore la variété locale avec 3790 kg/ha.

Le classement des variétés sur l'ensemble des sites du Mali permet de ressortir trois variétés IR 61920-3B-22-2-1 ; WAS 73-B-B-231-4 et D14 avec des rendements respectifs de 6343 ; 6287 et 6208 kg/ha. Le rendement du témoin (variété locale) est à 5570 kg/ha. Les sept autres variétés sélectionnées suivant le rendement sont: ROHYB 6 ; IR 71991-3R-2-6-1; ECIA 31-6066 (Sahel 210) ; IR 61247-3B-8-2-1 ; IR 72593-B-3-2-3-14 ; WAS 201-B-2 et IR 64419-3B-13-3.

o Sénégal

Trois variétés testées : IR 59418-7B-21-3; IR 72593-B-3-2-1-2-B et IR 72593-B-3-2-3-14 ont des rendements plus élevés que le témoin tolérant POKKALI (4000 kg/ha). Les dix variétés testées qui s'adaptent mieux dans ce site d'après les moyennes de rendements du GXE sont : IR 59418-7B-21-3 ; IR 72593-B-3-2-1-2-B ; IR 72593-B-3-2-3-14 ; IR 1829-3R-89-1-1 ; IR 76393-2B-7-1-13-1 ; IR 61920-3B-22-2-1 ; WAS 73-B-B-231-4 ; FL 478 et WAS 201-B-2.

o Gambie

Les variétés testées ont des rendements plus faibles que les deux meilleurs témoins (IR 4630 et la variété locale avec 2105 et 2005 kg/ha respectivement). Les dix meilleures variétés testées : IR 76346-B-B-10-1-11; IR 66946-3R-178-1-1; IR 65192-4B-11-3; IR 76393-2B-7-1-13-1; FL 478; IR 72593-B-3-2-3-8; IR 71991-3R-2-6-1; IR 67076-2B-8-2; IR 66401-2B-6-1-3 et ROHYB 6 ont des rendements évoluant entre 1969 et 1130 kg/ha.

IV. DISCUSSIONS

Choix des producteurs

Neuf variétés ont été choisies dans les trois pays. L'analyse de leur généalogie (tableau 10) permet de constater que :

- trois variétés sont sœurs: IR 72593-B-3-2-2-2-B ; IR 72593-B-3-2-3-14 et IR 72593-B-3-2-3-8 ;
- quatre variétés ont les mêmes donneurs du caractère de tolérance à la salinité PSB RC 86 : les 3 variétés sœurs et IR 76346-B-B-10-1-1-1
- la variété IR 65192-4B-11-3 (Gambie) a un parent PSB RC 48.

Tableau 10 : Pedigree des variétés choisies par les producteurs

Parents	Variétés	Pays
IR 20/IR 24//IR 65195-3B-13-2-3 (PSB RC 86)	IR 72593-B-3-2-2-2-B	Sénégal
IR 20/IR 24//IR 65195-3B-13-2-3 (PSB RC 86)	IR 72593-B-3-2-3-14	Gambie
IR 20/IR 24//IR 65195-3B-13-2-3 (PSB RC 86)	IR 72593-B-3-2-3-8	Mali
IRRI 126/IR 65195-3B-13-2-3 (PSB RC 86)	IR 76346-B-B-10-1-1-1	Mali - Gambie
IR 9884-54-3-1E-P1 (PSB RC 48)/KUATIK PUTIH	IR 65192-4B-11-3	Gambie
IR 31375-3-3-1-1/GETU (ACC 17041)//IR 10198-66-2	IR 59418-7B-21-3	Sénégal
IR 4630-22-2/IR 31785-58-1-2-3-3	WAS 73-B-B-231-4	Sénégal - Mali
BG 367-4/AT 401	IR 61247-3B-8-2-1	Gambie
D 14	D 14	Sénégal

En fait les variétés donneurs PSB RC 86 et PSB RC 48 font partie des premières développées en IRRI pedigree modifié (bulk à partir de F2 jusqu'à F4 ou F5, ensuite sélection par panicule comme pedigree) et « shuttle breeding » ou sélection par navette.

- La variété IR 59418-7B-21-3 a aussi un parent tolérant à la salinité : GETU qui fait aussi partie des premières variétés de l'IRRI développées par la sélection conventionnelle (Singh et *al.*, 2008 ; IRRI, 2015).
- La variété WAS 73-B-B-231-4 (Mali et Sénégal) a comme parent récurrent IR 4630 qui est un témoin international tolérant à la salinité.
- Quant à la variété IR 61247-3B-8-2-1 (Gambie), son parent donneur AT 401 est un descendant de POKKALI qui fait partie des premières variétés traditionnelles tolérantes à la salinité découverte en Inde (pedigree AT 401 : AT 94-1/POKKALI).

Ce choix des producteurs traduit donc une expression génétique issue d'un schéma de sélection variétale très riche.

Paramètres agronomiques

L'effet significatif de l'interaction génotype et l'environnement sur la variation des paramètres étudiés traduisent la différence des types de salinité différents entre les pays. Au Mali, la salinité est sous forme d'une alcalinisation caractérisée par une faible teneur en sels solubles, un pourcentage d'ions Na⁺ échangeables (ESP) élevé (≥ 15) et une dégradation de la structure des sols. Au Sénégal, la salinité est de type salin. Les sols salins sont dominés par les cations de sodium avec une conductivité électrique de plus de 4 dS/m, les anions dominants sont généralement du chlore et du sulfate solubles. Les valeurs du pH et SAR sont beaucoup plus faibles que dans les sols sodiques (Chinnusamy et *al.*, 2005). En Gambie, les mangroves sont classées dans le type de salinité salin mais se distinguent dans la gestion de la lame d'eau. La non-maîtrise de cette lame d'eau (système pluvial – défaut de drainage) entraîne des remontées salines plus importantes et fatales sur les jeunes plantules.

La réaction des variétés de riz à la salinité durant la phase de tallage est similaire à celle généralement développée par certaines variétés de riz soumises à un déficit hydrique au stade végétatif. L'effet défavorable du déficit hydrique est parfois compensé chez les variétés à stade végétatif long par l'apparition de nouvelles talles après la période de sécheresse, mais lorsque celle-ci devient trop longue et sévère et que certains pieds sont flétris, la compensation n'est plus possible (Stern, 1959 ; Asch et *al.*, 2000).

L'évolution du nombre de talles/plant n'est pas significative entre les variétés (Pr = 0,514). Le riz est une plante peu sensible à la salinité au tallage et très sensible en maturité (Koyama et *al.*, 2001).

La hauteur aussi a une variation entre les variétés non significative (Pr=0,525). La croissance du riz en stade plantule est ralentie en condition de salinité (3). Cependant au niveau du rendement, les variétés se distinguent significativement (Pr=0,0077). Le riz est très sensible à la salinité durant la phase de reproduction : diminution du nombre de talles fertiles, des grains remplis (Asch et *al.*, 2000). Les effets de la salinité sont plus graves au Sénégal et en Gambie. En Gambie, avec la mangrove la gestion de la parcelle devient plus difficile à cause du manque de drainage. L'eau stagne parfois pendant longtemps et n'est renouvelée que pendant la pluie, ce qui entraîne des niveaux de salinité très élevés. Dans cette zone, le niveau de mortalité des plants est plus important (10 variétés perdues) et les rendements sont les plus faibles. Au Sénégal, les pics de salinité de 7 à 12 dS/m ont entraîné des pertes de rendement considérables. La variété locale comme témoin utilisée est la Sahel 108 qui a une performance

en milieu paysan dans des conditions de non stress salinité de 7,5 tonnes / ha n'a donné que 843,75 kg/ha. Ce qui traduit l'incidence de salinité de -87% pour une variété sensible.

Au Mali, le niveau faible de la CE et le pH pas très basique, ont permis aux plantes de mieux s'exprimer en rendement. En moyenne au niveau des trois sites, 28 variétés ont donné des rendements meilleurs que le témoin local.,

Combinaison du choix des producteurs et des résultats statistiques

Parmi les critères de choix dégagés par les producteurs, trois seulement sont analysés statistiquement : le rendement, le tallage et la hauteur. L'analyse des composantes principales de rendement permet de montrer la bonne corrélation entre le tallage TM et le rendement RDT (figure 7). Le critère hauteur a été choisi en Gambie et s'explique par le mode de récolte. Dans ces zones de mangrove, la récolte s'effectue manuellement et les plants de grande taille sont plus faciles à récolter. Ce critère est très déterminant pour faire adopter une variété dans ces zones.

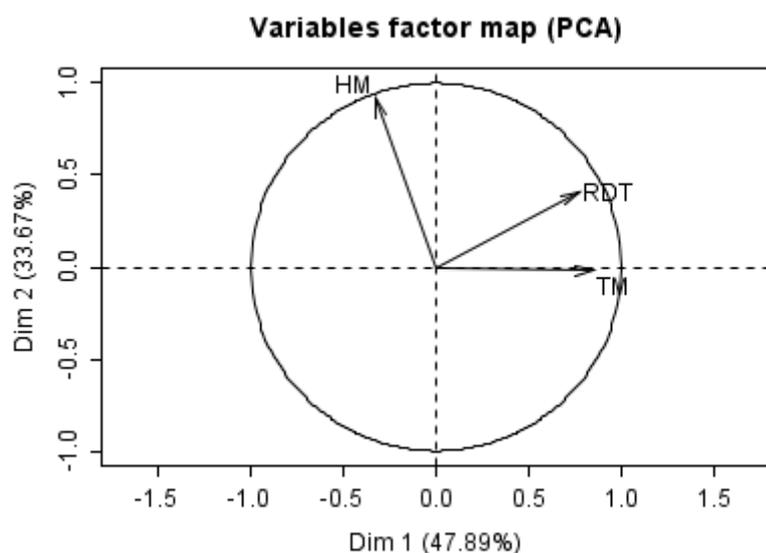


Figure 7 : Analyse des composantes principales de rendement – Corrélation entre les différents paramètres étudiés

La première variété WAS 73-B-B-231-4 choisie par les producteurs du Mali, se distingue des deux autres par son rendement qui, dans les trois sites, a une moyenne de 6287 kg/ha (supérieur au meilleur témoin). Au niveau du tallage, les variétés IR 76346-B-B-10-1-1-1 et IR 72593-B-3-2-3-8, choisies par les producteurs, ont un nombre de talles par plant moyen de 17 et 14 respectivement. Ce tallage est plus important que les deux témoins tolérants.

Au Sénégal, les variétés IR 72593-B-3-2-1-2-B et IR 59418-7B-21-3, choisies par les producteurs ont des rendements respectifs de 5218 et 5187 kg/ha, rendements supérieurs aux deux témoins tolérants. Quant à la variété WAS 73-B-B-231-4, elle se distingue aussi par ses grains longs et fins. Les Sénégalais préfèrent les grains de riz longs et fins. La variété IR 72593-B-3-2-2-2-B choisie par les producteurs, s'exprime aussi en tallage comme le témoin tolérant IR 4630.

En Gambie, les deux variétés choisies par les producteurs ont donné de bonnes performances : IR 76346-B-B-10-1-1-1 (meilleure variété testée) et IR 65192-4B-11-3 (3^{ème} position) dans le classement des moyennes de rendement après GXE.

La combinaison du choix des producteurs et des moyennes des paramètres après les analyses combinées de variances permet d'intégrer les critères des producteurs qui ne sont pas souvent pris en compte dans le processus de sélection. En dehors des composantes du rendement, les producteurs, en fonction des pratiques culturales, des modes alimentaires ou du marché, cherchent d'autres caractères sur le riz liés aux attaques d'oiseaux, la qualité du grain, la taille, la réaction du plant à une pression des mauvaises herbes (capacité du plant à se développer vite). Faisant suite au processus de la sélection variétale participative, les essais multi locaux (Sié et *al.*, 2009) conduits en année 2 vont être composés de 10 variétés sélectionnées par pays (Tableau 11):

- Sénégal : 9 variétés suivant les analyses de paramètres agronomiques contenant déjà 3 variétés choisies par les producteurs et la variété D14 ;
- Mali : 8 variétés dont une déjà choisie par les producteurs et 2 ajoutées : IR 76346-B-B-10-1-1-1 et IR 72593-B-3-2-3-8 ;
- Gambie : 2 variétés choisies par les producteurs sont déjà dans la liste des 8 meilleures performances agronomiques et 2 autres complètent la dizaine : IR 61247-3B-8-2-1 et IR 72593-B-3-2-3-14.

Tableau 11 : Variétés sélectionnées pour les essais multi locaux (avancés)

Sénégal	Mali	Gambie
IR +-B-3-2-3-14	IR 61920-3B-22-2-1	IR 76346-B-B-10-1-11
*IR 72593-B-3-2-1-2-B	WAS 73-B-B-231-4	IR 65192-4B-11-3
IR 59418-7B-21-3	D14	IR 66946-3R-178-1-1
IR 76393-2B-7-1-13-1	ROHYB 6	FL 478
IR 1829-3R-89-1-1	IR 71991-3R-2-6-1	IR 76393-2B-7-1-13-1
IR 61920-3B-22-2-1	IR 61247-3B-8-2-1	IR 71991-3R-2-6-1
WAS 73-B-B-231-4	IR 72593-B-3-2-3-14	IR 72593-B-3-2-3-8
WAS 201-B-2	WAS 201-B-2	IR 67076-2B-8-2
FL 478	IR 76346-B-B-10-1-1-1	IR 61247-3B-8-2-1
D14	IR 72593-B-3-2-3-8	IR 72593-B-3-2-3-14

- * Variété choisie par les producteurs

V. CONCLUSION

L'implication des producteurs dans le schéma de sélection de sélection revêt une importance capitale. Elle permet d'avoir les critères majeurs d'appréciation des variétés au niveau des producteurs et améliore le taux d'adoption des variétés homologuées. Cette implication des producteurs permet, dès ce stade de la sélection, de prendre en compte leur choix et de diffuser les performances des variétés.

Dans le cadre des activités du groupe d'actions des sélectionneurs de riz en Afrique, le nombre de variétés testées en première année de la SVP est une trentaine et, si la quantité de semence n'est pas un facteur limitant, le dispositif expérimental utilisé est généralement un alpha lattice avec 3 répétitions (Feder et Raghavarao, 1975). Les autres essais qui suivent pendant les deux autres années sont essentiellement conduits en milieu paysan, ce qui va permettre aux producteurs de confirmer les performances des variétés dans leur propre champ et de juger le niveau d'adoption. L'objectif de tout programme de sélection est de mettre à la disposition des producteurs des variétés plus productives que les dernières vulgarisées avec un taux d'adoption meilleur. Cependant, la sélection variétale participative, telle qu'utilisée pour intégrer le choix du producteur, connaît quelques limites. En effet, dans un dispositif statistique, le producteur effectue son choix sans tenir compte des répétitions ou des blocs. Dans certains cas, le choix est effectué dans une seule répétition. Au lieu donc d'un choix, un barème de notation simple de chaque parcelle permettrait de faire des analyses statistiquement et ainsi de mieux les intégrer les avis des producteurs.

En année 2, les 10 variétés choisies dans chaque pays seront conduits en essais multi locaux et en essais paysans. Les premiers essais doivent être au nombre de 4 dont un site en station pour faire la caractérisation DHS et les 3 autres pour les VATE.

L'homologation des variétés est du ressort du Comité National Semences Plants qui, en son sein doit disposer d'une entité comme le corps des contrôleurs agréés, chargée d'effectuer les tests de caractérisation DHS et VATE.

La variété est une œuvre scientifique de plusieurs années de recherches, elle doit être ainsi être bien identifiée pour une bonne protection.

CHAPITRE III
EFFETS DE LA SALINITE AU CHAMP
SUR DES PARAMETRES
AGRONOMIQUES DE 23 VARIETES DE
RIZ

Article publié le 31 Juillet 2016 dans Journal of Animal and Plant Sciences (J. Anim. Plant Sci.) ISSN 2071 – 7024 est indexé par : CABI Index veterinarius, DOAJ

CHAPITRE III : EFFETS DE LA SALINITE AU CHAMP SUR DES PARAMETRES AGRONOMIQUES DE 23 VARIETES DE RIZ

I. INTRODUCTION

La consommation du riz (*Oryza Sativa* L.) dans le continent africain a augmenté de 16 à 29 millions de tonnes entre 2000 et 2012 et en Afrique sub-saharienne de 12 à 24 Mt (Seck *et al.*, 2013). La culture de cette céréale se fait dans différents systèmes agro-écologiques : irrigué, pluvial plateau et bas- fond et en mangrove. Le continent regorge encore de fortes potentialités en terres cultivables, mais avec les effets néfastes du changement climatique, le taux d'accroissement des superficies culturales est atténué par les stress abiotiques. La salinité des sols fait partie des stress abiotiques majeurs pouvant ralentir l'augmentation de la production du riz dans le monde (Zeng *et al.*, 2000). Au Sénégal, les terres salées couvraient en 2008 une superficie de 996.947 ha, dont 179.765 ha dans la Vallée du Fleuve Sénégal (INP, 2008). Les pratiques d'irrigation habituellement utilisées et qui entraînent un maintien continu de la lame d'eau en début de la phase végétative augmentent le niveau de salinité. Les effets visibles de salinité sur le riz sont : la diminution du taux de croissance des plants, les dégâts sur le méristème des jeunes plantules, la baisse des composantes de rendement et les symptômes typiques du désordre nutritionnel dans les conditions de stress osmotique et ionique. En général, les jeunes plantules sont très sensibles en condition de stress de salinité (Pearson et Bernstein, 1959 ; Kadah, 1963 ; Flowers et Yeo, 1981). Au niveau de la panicule, les ramifications, la longueur, le nombre d'épillets et le poids sont aussi significativement réduits par la salinité (Heenan et McCaffery, 1988 ; Khatun *et al.*, 1995 ; Scardaci *et al.*, 1996 ; Ismail *et al.*, 2007). Au niveau physiologique, les différentes stratégies pour s'adapter dans des conditions de salinité des plantes sont décrites par l'IRRI (International Rice Research Institute) :

- exclusion : c'est une restriction de l'entrée des ions toxiques au niveau des racines ;
- transfert des ions toxiques au niveau des feuilles âgées ou dans la tige ;
- évacuation (excrétion) du sel, à travers des glandes où des poils (surtout chez les halophytes) ;

- séquestration des ions toxiques au niveau de la vacuole (Borsani *et al.*, 2003 ; Munns, 2005 ; Yamaguchi et Blumwald, 2005 ; Apse et Blumwald, 2007 ; Munns et Tester, 2008 ; Hanana *et al.*, 2011 ; IRRI, accédé le 25/12/2015).

Les stratégies de lutte contre la salinité en productions végétales sont souvent axées, à la fois, sur le développement des options de gestion de pratiques culturales (Shannon, 1997) et l'amélioration génétique de tolérance à la salinité des nouvelles variétés (Epstein *et al.*, 1980). Le développement de ces technologies rizicoles dans les systèmes irrigués et les bas-fonds au Sénégal est encore très limité. Dans le domaine de l'amélioration variétale, les tests de criblage de variétés supposées tolérantes à la salinité conduits au niveau de l'Institut Sénégalais de Recherches Agricoles (ISRA), dans le cadre du projet STRASA (Stress Tolerant Rice for Africa and South Asia), ont permis de sélectionner des variétés prometteuses. Cependant, les succès des méthodes de criblage de variétés de riz basées sur la vigueur des plants et les symptômes des dégâts de la salinité sont limitées (Yeo et Flowers, 1990). La stratégie consistant à alterner un criblage de la diversité génétique avec des caractères physiologiques peut être une approche effective en sélection variétale pour la tolérance à la salinité. Les méthodes d'évaluation agronomique peuvent améliorer la caractérisation, particulièrement sur les rendements en grains, première étape d'un plan de sélection (Zeng *et al.*, 2002). Après une évaluation participative des variétés en milieu réel, suivie d'un criblage durant la phase végétative en serre avec un contrôle de salinité, cette étude de l'effet de la salinité sur les variétés en milieu réel permet de voir les incidents du sel sur quelques paramètres agro-morphologiques et à partir d'une classification sélectionner les lignées les plus prometteuses.

II. MATERIEL ET METHODES

L'essai a été installé dans les parcelles expérimentales de la station du Centre du riz pour l'Afrique (AfricaRice) basé au Sénégal, zone Sahel situé à Ndiaye 16°14'N, 16°14'W, dans la région de Saint Louis département de Dagana durant la contre saison 2015 (février – juillet). Le matériel végétal est composé de 23 lignées choisies après un criblage pour la tolérance à la salinité en Gambie, au Mali et au Sénégal et 5 témoins soit 28 entrées au total (Tableau 12). Les témoins sont composés de 4 variétés introduites : IR 4630 ; FL 478, Nona Bokra tolérantes et IR 29 sensible à la salinité et un témoin local sensible Sahel 108.

Tableau 12 : Liste des variétés et leur généalogie

VARIETIES	GENEALOGIE
IR 4630	PELITA I-1/POKKALI (ACC 8948)//IR 2061-464-2//IR 1820-52-2
SAHEL 108	IR 30 (BPH S)/BABAWEE//IR 36
IR 29	IR 1561-149-1//IR 1737//IR 833-6-2-1-1
FL478	FL478
WAS 73-B-B-231-4	IR 4630-22-2//IR 31785-58-1-2-3-3
WAS 174-B-8-4	IR 4630-22-2//IR 67418-238-6-2-3-3
D 14	D 14
WAS 201-B-2	WAS 201
IR 1829-3R-89-1-1	IR 1366-120-3-1//IR 1539-111
IR 71991-3R-2-6-1	IR 5//IRRI 126
Nona Bokra	Nona Bokra
IR 65192-4B-11-3	IR 9884-54-3-1E-P1 (PSB RC 48)/KUATIK PUTIH
IR 59418-7B-21-3	IR 50404//AT 401//IR 10198-66-2
IR 61920-3B-22-2-1	IR 32429-47-3-2//WAGWAG
SAHEL 201	IR 2071-586//BG 400-1-SLR
IR 31785	IR 31785
IKONG PAO	IKONG PAO
IR 197-B-8-2	BLUEBELLE/TAINAN LINE 487 (T 487)
IR 76346-B-B-10-1-1-1	IRRI 126//IR 65195-3B-13-2-3 (PSB RC 86)
HASAWI	HASAWI
WAS 191-7-WAB-1-1-1	TOG 5681/4*IR 64//IR 64
IR 70023-4B-R-12-3-1-1	IR 50184-3B-8-2B-1//IR 10198-66-2
WAS 73-B-B-231-4	IR 4630-22-2//IR 31785-58-1-2-3-3
IR 85920-11-2-1-AJY1-2-B	IR 84087-19//IR00A110//IR00A110
IR 88314-1-AJY 1-B	IR 66946-3R-178-1-1/2*IR 73718-23-2-1-3
WAS 206-B-B-2-2-1	WAS 206-B-B-2-2-1
IR 72593-B-3-2-3-8	IR 20//IR 24//IR 65195-3B-13-2-3 (PSB RC 86)
IR 72593-B-3-2-3-14	IR 20//IR 24//IR 65195-3B-13-2-3 (PSB RC 86)

Les autres matériels sont composés de:

- un appareil de mesure de la Conductivité Électrique (CE exprimée en déci-Siemes par mètre dS/m) qui a permis d'estimer la quantité de sel avec la formule (LENNTECH, accédé le 10/09/2015)

$C = 640 CE$ (concentration en sel C et la conductivité électrique CE)

- un pH mètre pour mesurer le niveau d'acidité de l'eau d'irrigation,
- des tuyaux en plastique servant de piézomètres pour mesurer le niveau de salinité de la nappe d'eau et son ph. Trois piézomètres étaient installés diagonalement dans chaque environnement ;

- une solution composée essentiellement de l'eau et sel ordinaire de cuisine a permis d'ajuster les niveaux de salinité cherchés dans chaque environnement,
- les informations complémentaires (pedigree) sur le matériel végétal ont été tirées du logiciel de BMS version 3.0.8. téléchargé à partir de la plateforme de IBP « Integreting Breeding Plateforme » (IBP, accédé le 14/02/2015). Le BMS a été aussi utilisé pour la gestion des données, l'élaboration du cahier de champ exporté dans une tablette.

Le dispositif expérimental était en alpha lattice, avec 3 répétitions dans chaque environnement. Chaque répétition était composée de 7 blocs et chaque bloc de 4 parcelles/variétés. La taille d'une parcelle élémentaire était de 2,80x1 m, avec 5 lignes de 2,8 m. La parcelle utile constituée des trois lignes centrales avec 2,4 mètres de long soit une superficie de 1,56 m². Le nombre d'environnements est de 4 :

- l'environnement 1 (E1) a servi de contrôle avec sans apport de solution salée ;
- l'environnement 2 (E2), le niveau de salinité était fixé à 3 dS/m avec des apports de solution salée pour réguler la salinité;
- l'environnement 3 (E3), avec un niveau de salinité de 6 dS/m, ce qui a entraîné des apports de solution salée importants.
- l'environnement (E4) avait le niveau de salinité le plus élevé avec 9 dS/m.

Ce dispositif permet de suivre les effets du sel d'un nombre important de variétés à des niveaux de salinité différents.

Les analyses combinées de variances ont été faites avec le breeding view et les classifications K-means réalisées avec le logiciel R. L'incidence de la salinité sur un paramètre est calculé avec la formule (Ahmadi, 2011):

$$Xs.k \text{ (en \%)} = (Xb - Xi) * 100 / Xi$$

Avec :

Xs.k = incidence de la salinité sur les plants en mesurant le paramètre k.

Xi = la mesure du paramètre à un niveau de référence i où la plante ne reçoit aucun stress (condition optimum). Dans notre expérience, l'environnement de contrôle 0 est notre référence.

Xb = la mesure du paramètre à un niveau de stress b (environnement testé 3 ; 6 ou 9 dS/m)

Au sens strict du terme, l'héritabilité d'un caractère est décrite par la régression de la performance des descendances sur la moyenne de performance des parents.

Dans une population en brassage l'héritabilité (h^2) est définie par :

$$h^2 = \text{cov}(\text{parental mean, offspring}) / \text{var}(\text{parental mean}) = \sigma^2_A / \sigma^2_P$$

σ^2_A = variance génétique additive

σ^2_P = variance phénotypique

Au sens large du terme, l'héritabilité est égale à la variance génétique sur la variance phénotypique. ($h^2 = \sigma^2_g / \sigma^2_P$ avec $\sigma^2_A =$ variance génétique et $\sigma^2_P =$ variance phénotypique)

L'héritabilité opérationnelle s'applique à des :

- unités de sélection génétiquement constantes, c'est-à-dire des populations des lignées ou des clones ;
- moyennes des entrées issues des essais

$h^2 = \sigma^2_g / \sigma^2_P$ avec $\sigma^2_g = (\text{MC}_{\text{entrée}} - \text{MC}_{\text{résiduel}}) / r$ et $\sigma^2_P = \text{MC}_{\text{entrée}} / r$; MC= Moyenne carrée et r nombre de répétitions.

- la valeur estimée pour σ^2_g dépend de la diversité des entrées
- la valeur estimée pour σ^2_P dépend de l'essai

Le sélectionneur peut ainsi influencer l'héritabilité opérationnelle par le dispositif expérimental de l'essai (Fred et Schipprack, 2014). L'héritabilité de chaque paramètre étudié est calculée dans cette étude pour nous permettre de juger la qualité des données. Les variétés ont été semées en pépinière et, après 21 jours, repiquées avec un écartement de 20x20 cm. Les irrigations s'effectuaient à la raie hebdomadairement avec un suivi régulier de la lame d'eau et du niveau de salinité. Les mauvaises herbes étaient contrôlées par un traitement à l'aide d'un mélange de Propanil et Weedone (matières actives en g/l Propanil : 360 et 2.4 D : 480 respectivement) accompagné d'un désherbage manuel en cas de nécessité. Quant à la fertilisation, le N-P-K en 124-68-4 a été apporté sous forme d'urée (46%), DAP (18 – 46%) et KCl. Les mesures de conductivité électrique s'effectuaient tous les lundis, mercredis et vendredis sur trois points choisis et fixés diagonalement dans chaque répétition sur la lame d'eau et dans chaque piézomètre. Les apports de sel ont démarré 2 semaines après le repiquage et suivant le niveau de salinité. Les paramètres suivis et étudiés sont le nombre de panicule par plant, la hauteur, le nombre de jours à la maturité et les rendements en grains et en biomasse aérienne.

Caractérisation des environnements

Eau d'irrigation de surface dans les parcelles : Les mesures de la CE au niveau de chaque environnement ont permis d'avoir l'évolution de la salinité dans le temps. L'analyse de la variance de l'interaction des dates de mesures et des environnements révèle un effet significatif sur l'évolution CE de la lame d'eau. La salinité entre les environnements est aussi significativement différente ($P < 0,001$). Les niveaux de salinité par environnement ont évolué

suivant les dates et montrent des fluctuations parfois s'écartant de la CE visée. Au repiquage effectué le 07 avril, les niveaux de la salinité au niveau des environnements étaient de 5,1 ; 5,8 ; 4,2 et 5,1 dS/m respectivement dans E1 ; E2 ; E3 et E4. Pour assurer une bonne reprise des plants, la lame d'eau a été renouvelée toutes les 48 heures jusqu'à la date du 21 avril où les apports de solution salée ont démarré. Les niveaux de salinité dans les environnements E1, E2, E3 et E4 ont évolué en moyenne pour la suite de 1,8 ; 3,8 ; 6,1 et 8,4 dS/m respectivement (Figure 8).

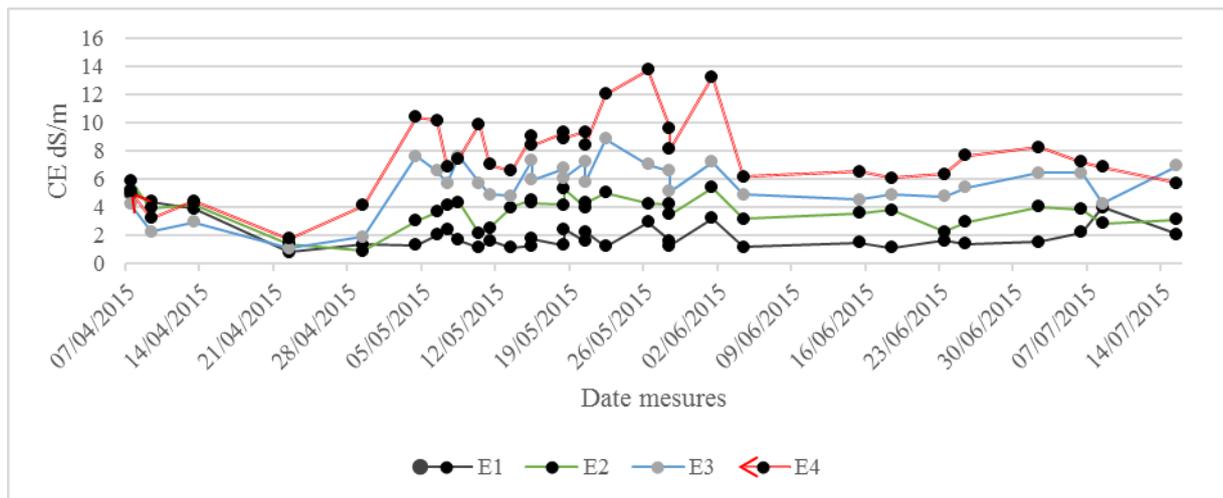


Figure 8 : Évolution de la conductivité électrique de la lame d'eau au niveau des parcelles dans les différents environnements suivant les dates de mesures.

Eau des piézomètres (20 cm de profondeur) : Les mesures de CE dans les piézomètres ont démarré le 07 mai 2015. L'analyse de la variance combinée des mesures de CE des environnements en fonction des dates de mesure a révélé une interaction significative ($Pr < 0,0001$). Les CE moyennes des environnements sur l'ensemble des mesures sont de 3,15 ; 4,86 ; 6,33 et 8,40 ds/m respectivement en E1, E2 E3 et E4. La salinité de la nappe est plus élevée que l'eau d'irrigation (Figure 9).

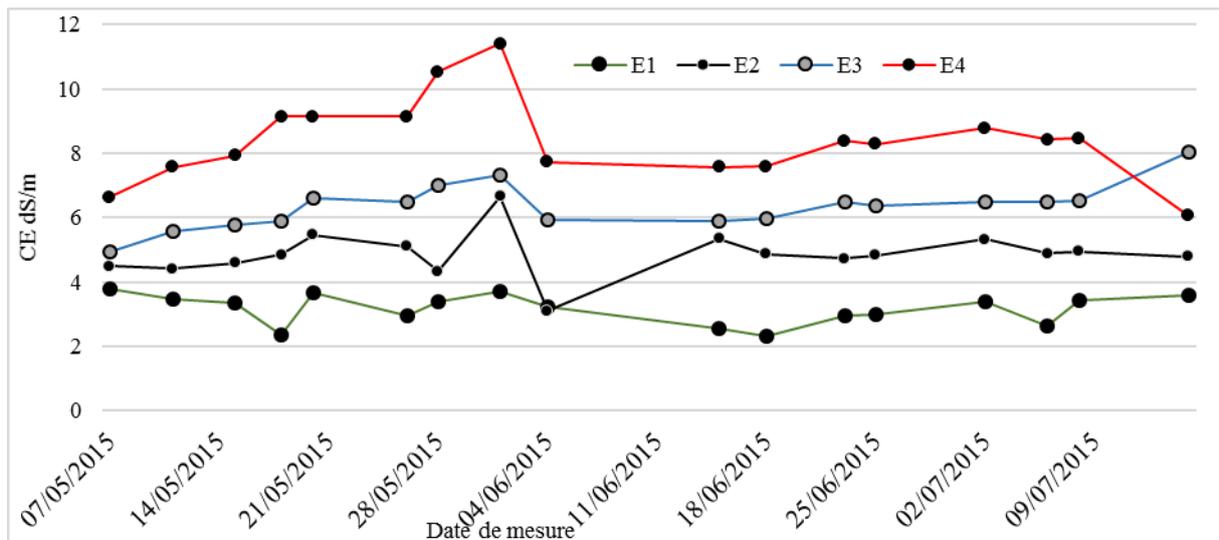


Figure 9 : Évolution de la conductivité électrique dans les différents environnements suivant les dates de mesures de l'eau de la nappe dans les piézomètres

Évolution du pH : Quant au pH, l'analyse de variance combinée dans les différents environnements suivant les dates de mesure ne montre pas un effet significatif de l'interaction ($P=0,1737$). Le Ph moyen dans les environnements est ainsi de 7,45 (Figure 10).

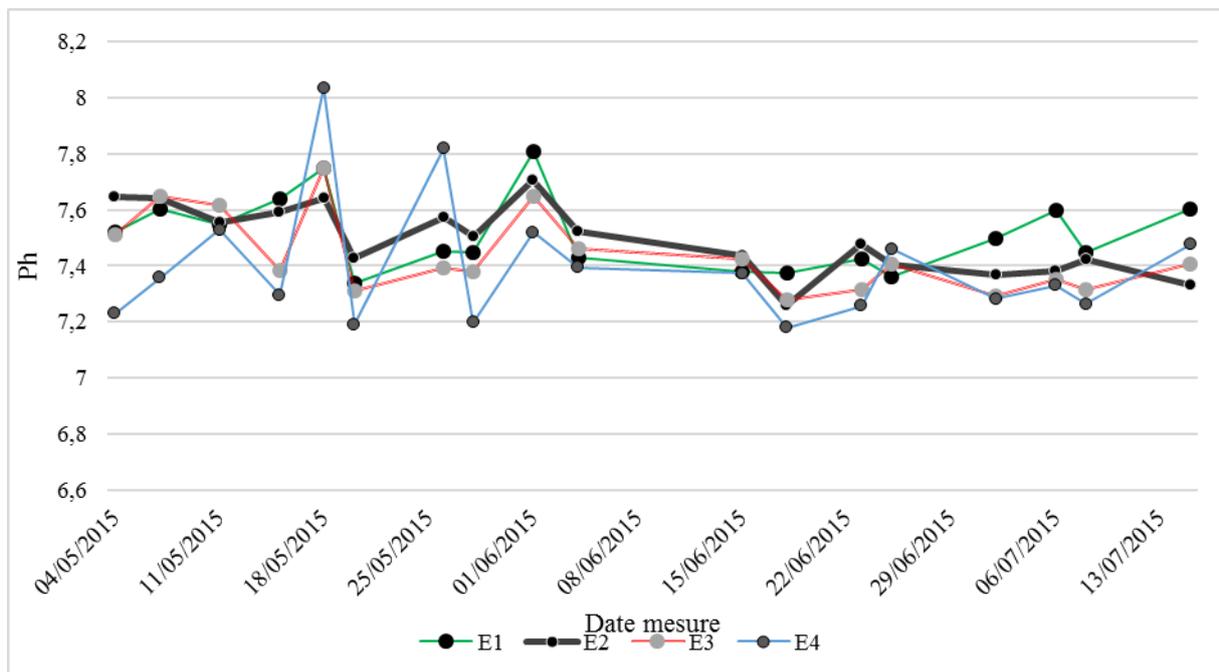


Figure 10 : Évolution des moyennes de ph dans différents environnement en fonction des dates de mesure

III. RESULTATS

Paramètres agronomiques : Dans l'environnement E4, la gestion des remontées du sel lors du repiquage et durant tout le stade plantule n'a pas permis aux plantes de survivre (CE variant entre 6,5 et 11,7 dS/m). Les paramètres suivis n'ont pas pu être mesurés.

Le nombre de panicules par plant : Les héritabilités opérationnelles du nombre de panicules par plant dans les environnements E1, E2, et E3 sont respectivement de 85 ; 60 et 67 %. L'analyse de variance combinée au niveau des trois environnements montre un effet de l'interaction GxE significatif ($Pr < 0,0001$) sur l'évolution du nombre de panicules par plant. Cette évolution est aussi différente significativement entre les environnements ($Pr < 0,0001$) et entre les variétés ($Pr = 3,3E-08$). L'analyse simple de la variance au niveau de chaque environnement montre aussi que la différence du nombre de panicules par plant est hautement significative entre les variétés ($Pr = 6,7E-26$; $2,4E-05$ et $3,1E-07$ respectivement en E1, E2 et E3). Les moyennes de nombre de panicules par plant évoluent de 12,8 de l'environnement de contrôle (E1) à 12,3 et 5 respectivement dans les environnements E2 (3 ds/m) et E (6 ds/m). Les incidents de la salinité sur le nombre de panicule ont engendré des pertes de panicules de 4,8 % dans l'environnement E2 à 58,8 % dans l'environnement E3 (Tableau 13).

Tableau 13 : Moyennes de nombre de panicules par plant issues de l'analyse GXE

Variétés	E1	E2	E3	INC.E2	INC.E3
D 14	9,9	11,2	10,0	13,9	1,2
FL 478	9,0	11,1	8,4	23,5	-7,1
HASSAWI	-	-	-	-	-
IKP	11,6	13,3	8,0	14,7	-31,2
IR 1829-3R-89-1-1	12,2	8,2	8,0	-32,8	-34,0
IR 29	14,7	12,4	4,4	-15,5	-70,3
IR 31785	15,4	12,7	3,6	-18,0	-76,6
IR 4630	16,2	11,6	14,5	-28,2	-10,1
IR 59418-7B-21-3	13,1	9,3	2,8	-28,9	-78,6
IR 61920-3B-22-2-1	10,1	12,4	9,1	23,0	-9,9
IR 65192-4B-11-3	14,1	16,6	0,2	17,6	-98,4
IR 70023-4B-B-12-3-1-1	21,3	13,2	12,4	-37,9	-41,9
IR 71991-3R-2-6-1	16,3	19,7	1,3	20,9	-92,1
IR 72593-B-3-2-3-14	10,8	11,9	3,3	10,5	-69,1
IR 72593-B-3-2-3-8	14,3	8,5	6,4	-40,4	-55,3
IR 76346-B-B-10-1-1-1	13,4	11,2	3,3	-16,3	-75,7
IR 85920-11-2-1-ATY-2-B	14,7	19,9	5,2	35,7	-64,6
IR88314-1-ATY1-B	16,0	10,8	5,6	-32,5	-64,6
NONA BOKRA	-	-	-	-	-
SAHEL 108	11,2	13,1	0,0	16,8	-100,0
SAHEL 201	19,1	21,6	0,0	13,3	-100,0
WAS 174-B-8-4	13,4	13,8	1,1	3,1	-92,1
WAS 191-7-WAB-1-1-1	15,8	13,8	7,2	-12,9	-54,6
WAS 197-B-8-2	14,6	13,2	3,7	-10,0	-75,1
WAS 201-B-2	12,4	11,1	5,8	-10,1	-53,1
WAS 206-B-3	12,6	10,2	4,3	-18,7	-66,2
WAS 73-B-B-231-4	10,8	9,7	4,3	-9,8	-60,0
WAS 73-B-B-231-4-ARS1	16,1	15,3	9,3	-5,1	-42,1
Moyenne	12,8	12,3	5,1	-4,8	-58,5
Héritabilité	0,8592	0,6003	0,6748		
Pr GXE (combine ANOVA)	3,3E-08				
Pr variétés (combine ANOVA)	6,5E-20				
Pr Env. (combine ANOVA)	1,2E-09				
Pr variétés (ANOVA)	6,7E-26	2,4E-05	3,1E-07		

La hauteur du plant : Les héritabilités opérationnelles des mesures de hauteur des plants sont de 94,1 ; 89,4 et 75,1 % dans les environnements respectifs de E1, E2 et E3. L'effet de l'interaction des variétés et des environnements sur la hauteur est significatif (Pr=4,7E-16). L'évolution de la hauteur des plants est significativement différente entre les différents

environnements et entre les variétés elles-mêmes dans les trois environnements. L'analyse simple de la variance au niveau de chaque environnement permet de voir la variation significative entre les variétés au niveau de chaque environnement ($Pr=1,1E-74$ en E1 ; $Pr = 2,4E-35$ en E2 et $Pr= 3,2E-11$ dans E3). Les moyennes des hauteurs par environnement diminuent suivant le niveau de salinité (94,9 cm pour l'environnement de contrôle et 82,5 cm pour E2 et 53,9 cm pour E3). Ce qui s'exprime au niveau de l'incident moyen de la salinité sur la hauteur des plants en E2 avec -12,5% et E3 -42,9% (tableau 14).

Tableau 14 : Moyennes de la hauteur en cm des plants issues de l'analyse GXE

Variétés	E1	E2	E3	INC.E2	INC.E3
D 14	83,7	75,4	62,1	-9,9	-25,8
FL 478	85,4	82,0	63,4	-3,9	-25,7
HASSAWI	135,4	102,5	72,4	-24,3	-46,5
IKP	89,1	75,4	56,8	-15,4	-36,3
IR 1829-3R-89-1-1	86,2	86,9	63,2	0,8	-26,7
IR 29	84,0	72,0	34,6	-14,2	-58,7
IR 31785	80,1	66,4	64,4	-17,0	-19,6
IR 4630	104,3	78,0	67,2	-25,3	-35,6
IR 59418-7B-21-3	85,4	81,4	43,0	-4,7	-49,7
IR 61920-3B-22-2-1	80,0	68,8	54,5	-14,0	-31,9
IR 65192-4B-11-3	80,5	73,3	55,7	-8,9	-30,7
IR 70023-4B-B-12-3-1-1	101,1	87,7	72,7	-13,3	-28,1
IR 71991-3R-2-6-1	90,6	89,3	73,9	-1,4	-18,4
IR 72593-B-3-2-3-14	89,9	75,8	40,7	-15,7	-54,8
IR 72593-B-3-2-3-8	94,5	82,7	67,3	-12,5	-28,8
IR 76346-B-B-10-1-1-1	98,8	79,6	63,8	-19,4	-35,4
IR 85920-11-2-1-ATY-2-B	103,0	96,9	65,3	-6,0	-36,6
IR88314-1-ATY1-B	105,3	87,9	62,4	-16,6	-40,7
NONA BOKRA	153,5	118,0	51,0	-23,1	-66,8
SAHEL 108	79,2	67,4	-	-14,9	-100
SAHEL 201	90,9	81,3	16,6	-10,6	-81,7
WAS 174-B-8-4	88,1	71,3	12,4	-19,1	-85,9
WAS 191-7-WAB-1-1-1	111,9	95,5	70,2	-14,6	-37,3
WAS 197-B-8-2	91,4	83,3	25,4	-8,8	-72,2
WAS 201-B-2	92,7	80,2	60,3	-13,5	-34,9
WAS 206-B-3	99,6	91,8	66,6	-7,9	-33,1
WAS 73-B-B-231-4	86,2	80,6	61,5	-6,5	-28,7
WAS 73-B-B-231-4-ARS1	86,7	79,6	60,9	-8,1	-29,7
Moyenne en cm	94,9	82,5	53,9	-12,5	-42,9
Héritabilité	0,9412	0,8939	0,7515		
Pr GXE (Combine ANOVA)	4,7E-16				
Pr Env. (Combine ANOVA)	4,1E-19				
Pr Variété (Combine ANOVA)	4,1E-47				
Pr (ANOVA / environnement)	1,1E-74	2,4E-35	3,2E-11		

Le nombre de jours à la maturité : L'analyse combinée de la variance dans les différents environnements montre une interaction des variétés et des environnements hautement significative (Pr=7,071E-07) sur la variation du nombre de jours de maturité des plants. L'analyse de variance par environnement montre aussi que les réactions des variétés suivant

le nombre de jours à la maturité sont significativement différentes entre elles. La variation du nombre de jours moyens par environnement des variétés E1 à E3 traduit l'effet de la salinité. L'incident de la salinité sur la maturité des plants est ainsi de 1,04% en E2 : un rallongement général du cycle de maturité ; de -33,04 % en E3 : une diminution du cycle à la maturité (Tableau 15).

Tableau 15 : Moyennes du nombre de jours à la maturité issues de l'analyse GXE

Variétés	E1	E2	E3	INC.E2	INC.E3
D 14	142	129	136	-9,15	-4,10
FL 478	138	129	156	-6,52	13,47
HASSAWI	-	-	-	-	-
IKP	134	134	135	0,00	0,42
IR 1829-3R-89-1-1	133	131	135	-1,50	1,09
IR 29	133	129	93	-3,01	-30,29
IR 31785	134	124	89	-7,46	-33,43
IR 4630	156	156	113	0,00	-27,39
IR 59418-7B-21-3	129	132	103	2,33	-20,22
IR 61920-3B-22-2-1	129	129	132	0,00	2,40
IR 65192-4B-11-3	143	155	-	8,14	-
IR 70023-4B-B-12-3-1-1	145	141	152	-2,76	5,11
IR 71991-3R-2-6-1	97	151	53	55,14	-45,26
IR 72593-B-3-2-3-14	135	129	94	-4,44	-30,09
IR 72593-B-3-2-3-8	132	129	155	-2,27	17,23
IR 76346-B-B-10-1-1-1	134	133	97	-0,75	-27,23
IR 85920-11-2-1-ATY-2-B	150	155	105	3,33	-30,28
IR88314-1-ATY1-B	141	141	113	0,00	-20,13
NONA BOKRA	-	-	-	-	-
SAHEL 108	132	130	-	-1,52	-
SAHEL 201	150	156	-	4,00	-
WAS 174-B-8-4	129	129	-	-	-
WAS 191-7-WAB-1-1-1	150	154	57	2,67	-62,14
WAS 197-B-8-2	129	129	47	0,00	-63,89
WAS 201-B-2	138	130	137	-5,80	-0,22
WAS 206-B-3	133	135	87	1,25	-34,41
WAS 73-B-B-231-4	129	135	99	4,65	-23,24
WAS 73-B-B-231-4-ARS1	142	129	81	-9,15	-42,74
Moyenne	126	127	84	1,04	-33,04
Héritabilité	0,939	0,9998	0,6402		
Pr GXE (ANOVA combiné)	7,071E-07				
Pr variétés (ANOVA combiné)	8,348E-42				
Pr Env (ANOVA combiné)	8,945E-08				
Pr (ANOVA)	8,49E-77	0	3,051E-32		

Biomasse : Le calcul de l'héritabilité du rendement en biomasse aérienne donne 85 ; 76 et 54 %, respectivement dans les environnements E1 ; E2 et E3. L'analyse combinée de la variance sur les trois environnements montre que l'effet de l'interaction du génotype et de l'environnement est hautement significatif sur le rendement en biomasse ($Pr=0,0001$). Entre les environnements, la biomasse des variétés varie aussi différemment ($Pr=0,004$). Les variétés ont aussi un comportement en biomasse très différent entre elles dans chaque environnement. Les moyennes de rendement biomasse évoluent ainsi de 7752 kg/ha dans l'environnement de contrôle (E1) à 6870 kg/ha à E2 et 4892 kg/ha dans E3. Ce qui se reflète au niveau des incidences moyennes de la salinité en E2 avec -8,9% puis en E3 avec -32,65 % (Tableau 16).

Tableau 16 : Moyennes du poids en Kg de la biomasse aérienne par variété issues de l'analyse GXE

Variétés	E1	E2	E3	INC.E2	INC.E3
D 14	5125,6	4944,4	5457,4	-3,53	6,47
FL 478	4857,8	6018,5	6844,2	23,89	40,89
HASSAWI	-	-	-	-	-
IKP	5634,8	6129,6	5831,2	8,78	3,49
IR 1829-3R-89-1-1	7264,6	3777,8	6604,5	-48,00	-9,09
IR 29	5762,0	5370,4	3789,2	-6,80	-34,24
IR 31785	5172,4	6518,5	3861,7	26,03	-25,34
IR 4630	18135,5	9814,8	12705,2	-45,88	-29,94
IR 59418-7B-21-3	5996,5	5351,9	1762,7	-10,75	-70,60
IR 61920-3B-22-2-1	5500,9	4777,8	5643,5	-13,15	2,59
IR 65192-4B-11-3	9578,9	8463,0	5006,2	-11,65	-47,74
IR 70023-4B-B-12-3-1-1	13270,9	7500,0	11292,2	-43,49	-14,91
IR 71991-3R-2-6-1	11267,1	14740,7	2515,5	30,83	-77,67
IR 72593-B-3-2-3-14	6165,1	6703,7	4681,8	8,74	-24,06
IR 72593-B-3-2-3-8	5318,2	3759,3	6043,2	-29,31	13,63
IR 76346-B-B-10-1-1-1	8272,8	5648,1	3386,5	-31,73	-59,06
IR 85920-11-2-1-ATY-2-B	11846,1	11351,9	6804,9	-4,17	-42,56
IR88314-1-ATY1-B	9224,1	9314,8	5459,2	0,98	-40,82
NONA BOKRA	-	-	-	-	-
SAHEL 108	5208,8	5111,1	0,0	-1,88	-100
SAHEL 201	11107,2	12648,1	350,6	13,87	-96,84
WAS 174-B-8-4	6417,1	4759,3	3597,3	-25,83	-43,94
WAS 191-7-WAB-1-1-1	14164,4	14740,7	10278,1	4,07	-27,44
WAS 197-B-8-2	7048,9	7296,3	2037,2	3,51	-71,10
WAS 201-B-2	6157,3	5481,5	5325,6	-10,98	-13,51
WAS 206-B-3	7197,1	9463,0	6160,2	31,48	-14,41
WAS 73-B-B-231-4	16573,1	3370,4	7252,1	-79,66	-56,24
WAS 73-B-B-231-4-ARS1	5523,2	5611,1	4607,2	1,59	-16,58
Moyenne	7752,6	6870,4	4892,9	-8,19	-32,65
Héritabilité	0,8589	0,7563	0,5375		
Pr GXE	0,00014				
Pr Env. (Combine ANOVA)	0,00474				
Pr Var. (Combine ANOVA)	2,04E-30				
Pr (ANOVA)	2,28E-24	4,0E-12	0,0003689		

Le rendement en grains en Kg/ha : La variation du rendement en grains par variété est fortement influencée par l'interaction des variétés et des environnements (Pr=1,2E-12). L'analyse de la variance au niveau de chaque environnement montre aussi que les rendements sont significativement différents entre les variétés. Les moyennes de rendement des variétés

par environnement évoluent de 6120 kg/ha dans l'environnement de contrôle à 3300 kg/ha au niveau de E2 et à 340 kg/ha à l'environnement E3. Ce qui traduit l'effet de la salinité sur le rendement en grains des variétés par une perte de 45,8% en E2 et de 93% en E3 (Tableau 17).

Tableau 17 : Moyennes du rendement en grains en kg/ha par variété issues de l'analyse GXE

Variétés	E1	E2	E3	INC.E2	INC.E3
FL 478	3839,9	3526,5	3013,3	-8,2	-21,5
IR 1829-3R-89-1-1	4402,0	3668,7	1667,6	-16,7	-62,1
D 14	6812,3	6050,3	1179,1	-11,2	-82,7
IR 29	6165,0	4796,6	667,0	-22,2	-89,2
IKP	7981,1	3419,9	597,0	-57,1	-92,5
IR 61920-3B-22-2-1	5866,4	4581,1	515,2	-21,9	-91,2
WAS 201-B-2	7676,5	3929,8	405,8	-48,8	-94,7
IR 72593-B-3-2-3-8	7570,9	3839,1	385,6	-49,3	-94,9
IR 59418-7B-21-3	9105,7	5490,3	225,8	-39,7	-97,5
IR 76346-B-B-10-1-1-1	3156,3	3538,8	221,8	12,1	-93,0
IR 70023-4B-B-12-3-1-1	4533,1	3325,7	154,5	-26,6	-96,6
WAS 206-B-3	7401,7	2454,7	128,9	-66,8	-98,3
IR 72593-B-3-2-3-14	8412,6	3204,8	115,7	-61,9	-98,6
WAS 197-B-8-2	7237,0	2468,1	98,4	-65,9	-98,6
IR 4630	4365,9	3382,7	92,8	-22,5	-97,9
IR88314-1-ATY1-B	6502,6	2379,5	84,3	-63,4	-98,7
WAS 191-7-WAB-1-1-1	5710,5	3773,7	66,9	-33,9	-98,8
IR 31785	9063,9	1996,1	44,5	-78,0	-99,5
IR 85920-11-2-1-ATY-2-B	6908,8	3436,3	42,1	-50,3	-99,4
WAS 73-B-B-231-4-ARS1	7349,7	3525,1	21,2	-52,0	-99,7
IR 65192-4B-11-3	6963,6	4558,3	20,5	-34,5	-99,7
WAS 174-B-8-4	5398,9	3982,8	15,2	-26,2	-99,7
SAHEL 108	9402,9	2108,4	0,0	-77,6	-100,0
HASSAWI	-	-	-	-	-
SAHEL 201	7237,1	2516,6	0,0	-65,2	-100,0
IR 71991-3R-2-6-1	5014,3	2259,2	0,0	-54,9	-100,0
WAS 73-B-B-231-4	7059,5	4169,9	0,0	-40,9	-100,0
NONABOKRA	-	-	-	-	-
Moyenne	6119,9	3299,4	339,3	-45,8	-93,0
Héritabilité	0,7934	0,6095	0,7326		
Pr GXE (ANOVA Combine)	1,2E-12				
Pr Env. (ANOVA Combine)	2,8E-46				
Pr Var. (ANOVA Combine)	7,1E-18				
Pr (ANOVA / Environnement)	9,6E-14	1,4E-05	3,8E-09		

Analyse multi-variée

- Analyse des composantes principales : L'analyse des composantes principales a permis d'illustrer les corrélations entre les différentes variables : le nombre de panicules par plant, la hauteur, le nombre de jours à la maturité, le poids sec de la biomasse aérienne et le

rendement en grains. Les deux premiers axes portent 83,31 % de l'information des variables. L'augmentation du nombre de panicules par plant est positivement corrélée avec le poids sec de la biomasse aérienne, le nombre de jours à la maturité (Figure 11).

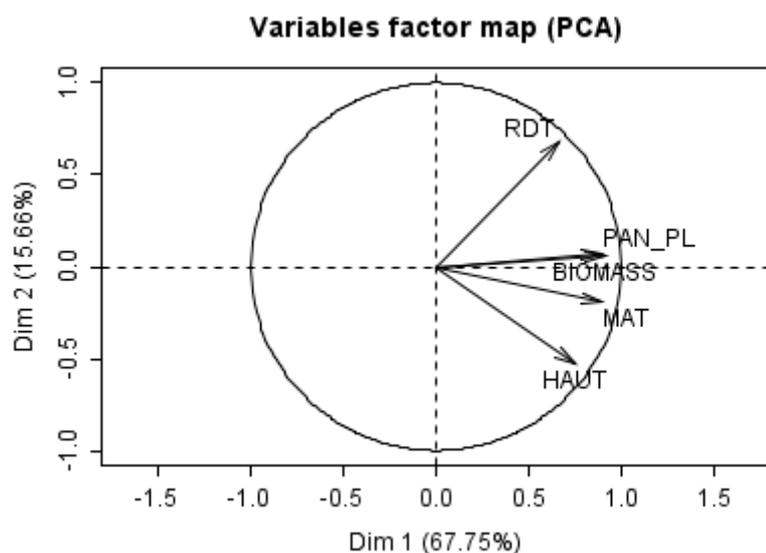


Figure 11 : Analyse de composantes principales – corrélation entre les paramètres

Classification K- means des variétés

- En fonction des paramètres agronomiques étudiés des variétés : La classification K-means a permis d'avoir 3 groupes de variétés, selon leurs performances en nombre de panicule par plant, nombre de jours à la maturité, hauteur, rendements en biomasse et en grains au niveau l'environnement E3 (tableaux 18 et 19).

Tableau 18 : Moyennes des variables dans les différentes classes

CLASSE	BIOMASS	HAUT	MAT	PAN_PL	RDT
1	11425.1	70.0	107.5	11.4	104.7
2	5837.2	60.1	138.1	7.8	584.0
3	2366.8	37.1	54.0	2.2	141.4

Tableau 19 : Résultats Classification K-means dans l'environnement E3

CLASSE 1	CLASSE 2	CLASSE 3
IR 4630	D 14	IR 29
IR 70023-4B-B-12-3-1-1	FL 478	IR 31785
WAS 191-7-WAB-1-1-1	IKP	IR 59418-7B-21-3
	IR 1829-3R-89-1-1	IR 71991-3R-2-6-1
	IR 61920-3B-22-2-1	IR 76346-B-B-10-1-1-1
	IR 65192-4B-11-3	SAHEL 108
	IR 72593-B-3-2-3-14	SAHEL 201
	IR 72593-B-3-2-3-8	WAS 174-B-8-4
	IR 85920-11-2-1-ATY-2-B	WAS 197-B-8-2
	IR 88314-1-ATY1-B	
	WAS 201-B-2	
	WAS 206-B-3	
	WAS 73-B-B-231-4	
	WAS 73-B-B-231-4-ARS1	

La classe 2 contient les variétés les plus performantes en rendement.

- En fonction de l'incidence de la salinité sur les paramètres étudiés : Cette classification avec K-means est faite avec les incidents au niveau de E3 calculés des différents paramètres étudiés (Tableaux 20 et 21).

Tableau 20 : Moyennes des incidents en % des différents paramètres étudiés utilisée par K-means

CLASSE	BIOMASSE	HAUT	MAT	PAN_PL	RDT
1	-71.92	-74.20	-92.10	-93.11	-99.61
2	-0.04	-30.41	0.89	-26.81	-81.57
3	-40.75	-36.89	-33.29	-67.87	-97.72

Tableau 21 : Classification des variétés par K-means

CLASSE 1 (sensible)	CLASSE 2 (variétés tolérantes)	CLASSE 3 (intermédiaire)
IR 65192-4B-11-3	D 14	IR 29
SAHEL 108	FL 478	IR 31785
SAHEL 201	IKP	IR 59418-7B-21-3
WAS 174-B-8-4	IR 1829-3R-89-1-1	IR 71991-3R-2-6-1
WAS 197-B-8-2	IR 4630	IR 72593-B-3-2-3-14
	IR 61920-3B-22-2-1	IR 76346-B-B-10-1-1-1
	IR 70023-4B-B-12-3-1-1	IR 85920-11-2-1-ATY-2-B
	IR 72593-B-3-2-3-8	IR88314-1-ATY1-B
	WAS 201-B-2	WAS 191-7-WAB-1-1-1
		WAS 206-B-3
		WAS 73-B-B-231-4
		WAS 73-B-B-231-4-ARS1

La classe 2 contient les variétés qui ont les plus faibles incidents de la salinité sur les paramètres.

IV. DISCUSSION

Dans les piézomètres, l'évolution de la conductivité électrique montre que la nappe est plus salée que l'eau d'irrigation de surface. En fait, la salinisation de l'eau de surface est accentuée par les remontées salines. Les variétés testées ne peuvent pas survivre à une salinité supérieure à 9 dS/m durant la phase plantule. Les effets de la salinité sur le riz varient suivant le niveau de salinité et les caractéristiques de la variété. Ils se sont traduits dans cette expérience par une perte de panicules, un retard de croissance, des diminutions du cycle de nombre de jours à la maturité et des rendements en biomasse aérienne et en grains. Ces comportements du riz en milieu salin sont confirmés dans certains de recherches. L'évolution du nombre de panicules par plant suivant le niveau croissant de la salinité est très variable. Dans l'environnement E2, certaines variétés ont réagi à la salinité en augmentant le nombre de panicules ; il s'agit de D14 ; FL 478 ; IKP ; IR 61920-3B-22-2-1 ; IR 65192-4B-11-3 ; IR 71991-3R-2-6-1 ; IR 72593-B-3-2-3-14 ; IR 85920-11-2-1-ATY-2-B ; SAHEL 108 ; SAHEL 201 et WAS 174-B-8-4. Cette réaction ressemble à celle généralement développée par certaines variétés de riz soumises à un déficit hydrique au stade végétatif. L'effet défavorable du déficit hydrique peut être compensé chez les variétés à stade végétatif long par l'apparition de nouvelles talles après la période de sécheresse, mais lorsque celle-ci devient trop longue et sévère et que certains pieds sont flétris, la compensation n'est plus possible (Assemien, 1984). Dans l'environnement E3, le stress se prolonge et devient plus salé ; seule la variété D14 a maintenu, voire amélioré, le nombre de panicules par plant ; toutes les autres variétés ont subi l'effet de la salinité en réduisant le nombre de panicules par plant. En effet, les effets du sel sur le tallage sont moins néfastes que sur le nombre de grains par panicule ; au Bangladesh, le nombre de talles par plant de la variété BR11 a augmenté entre les conditions de témoin (0 dS/m) et celles de : 7,81 dS/m (Purnenduet *al.*, 2004). La croissance des plants semble être plus affectée par la salinité. Toutes les variétés ont réagi négativement à la salinité à partir de E2 avec 12,5 % de réduction de la hauteur comparé à E1 et 42,9 % au niveau de E3. Ce retard de croissance de la plante dans des conditions de salinité fait partie des réactions majeures du riz (Singh et Flowers, 2010 ; Hanana *et al.*, 2011). Par rapport au nombre de jours à la maturité, son évolution par variété est très variable suivant le niveau de la salinité. Dans l'environnement le plus salé (E3) six variétés ont réagi en allongeant leur cycle : IKP, IR 1829-3R-89-1-1, IR 61920-3B-22-2-1, IR 70023-4B-B-12-3-1-1, FL 478 et IR 72593-B-3-2-3-8 ; les autres variétés ont raccourci leur cycle. Ce rallongement du cycle de maturité peut

être expliqué par un retard de la date de l'épiaison dû l'effet de la salinité. En effet, chez certaines variétés de riz, le retard de la date de l'épiaison fait partie des effets néfastes de la salinité (Grattan *et al.*, 2002). L'effet du sel sur le poids de matière sèche de la partie aérienne par variété suivant le niveau de salinité est aussi très variable. Deux variétés, IKP et FL 478, ont réagi en développant une biomasse aérienne plus importante dans les deux environnements E2 et E3. Dans l'environnement E2, 11 variétés ont augmenté leur poids sec et au niveau de l'environnement E3 seules deux variétés, FL 478 et IKP, ont eu une réaction positive sur leur biomasse à la salinité. En effet, la réaction du riz au niveau de sa biomasse à la salinité dépend du niveau de salinité et des variétés. Le poids sec biomasse chez certaines variétés peut augmenter du niveau de contrôle à 7,815 dS/m et commencer à décroître suivant le niveau croissant de salinité (Purnendu *et al.*, 2004). Les rendements en grains par variété ont chuté suivant le niveau croissant de la salinité. Dans l'environnement E3, seule la variété FL 478 a pu maintenir une perte de rendement de 21% ; les autres variétés ont enregistré des pertes de plus de 60%. Les trois variétés FL 478, D 14 et IR 1829-3R-89-1-1 ont pu résister dans l'environnement E3, avec un rendement de plus d'une tonne à l'hectare (tableau 20). Cette baisse du rendement est le résultat d'une réduction significative du nombre d'épillets, des ramifications et du poids de panicule (Sajjad, 1984 ; Heenan et McCaffery, 1988 ; Khatun *et al.*, 1995). Les variétés D14, FL 478, IKP, IR 1829-3R-89-1-1, IR 61920-3B-22-2-1, IR 72593-B-3-2-3-8 et WAS 201-B-2 se sont adaptées dans les environnements salés avec les plus faibles pertes liées surtout au rendement. Ces comportements traduisent les effets des mécanismes physiologiques de tolérance à la salinité. Un croisement de ces variétés avec des témoins locaux à haut rendement permettrait

- d'identifier les qtl « quantitative traits locus » de tolérance à la salinité en faisant un génotypage de la population F2 et un phénotypage de la F3
- de développer des lignées tolérantes à la salinité et à haut rendement

Les variétés D14, IR 59418-7B-21-3, IR 61920-3B-22-2-1 et WAS 73-B-B-231-4, ont des performances constantes avec des rendements supérieurs à 4 tonnes à l'hectare dans des conditions de salinité de 4,86 dS/m en moyenne. Elles ont été choisies en première année de sélection variétale participative en 2009 au Sénégal et au Mali. Un essai de caractérisation DHS permettrait de les proposer à l'homologation pour une production dans les zones de salinité moyenne.

V. CONCLUSION

Les effets du sel sur les variétés étudiées ont permis de voir différentes réactions sur le nombre de panicules par plant, la hauteur, le nombre de jours de maturité, le poids sec de la biomasse aérienne et le rendement en grains. La réaction du riz à la salinité est très complexe :

- certaines variétés ont diminué le nombre de panicules par plant suivant l'évolution croissante de la salinité ;
- d'autres ont augmenté le nombre de panicules par plant jusqu'à l'environnement E2. À partir d'E3, une seule variété D14 a échappé à l'effet néfaste de la salinité sur l'évolution du nombre de panicules.

Concernant la hauteur et le rendement en grains, toutes les variétés étudiées ont subi l'effet néfaste du niveau croissant de la salinité. La réaction du riz à la salinité sur la durée du cycle et du poids sec de la biomasse est aussi très variable suivant l'évolution croissante du niveau de salinité.

Ces effets du sel sur les variétés ont permis de les classer suivant :

- leur performance agronomique ;
- l'évolution des incidents du sel sur le riz comparé à un témoin E1. Ces réactions de la plante sont le résultat d'une stratégie physiologique qui permet de contrôler la salinité.

Les variétés D14, FL 478, IKP, IR 1829-3R-89-1-1, IR 61920-3B-22-2-1, IR 72593-B-3-2-3-8 et WAS 201-B-2 ont toléré les effets du sel en dégageant des stratégies qui permettent de limiter les effets néfastes de la salinité. Elles sont ainsi mieux indiquées dans les schémas de croisement ou de développement de nouvelles variétés tolérantes à la salinité des variétés locales. La variété D14 a une tolérance à la salinité plus constante, elle a été choisie par les producteurs en première année de PVS et faisant partie du premier lot des variétés criblées durant la phase végétative dans un environnement de 9 dS/m. Quant aux variétés D14, IR 59418-7B-21-3, IR 61920-3B-22-2-1 et WAS 73-B-B-231-4, elles ont confirmé leur performance avec des rendements supérieurs à 4 T/ha dans des conditions de salinité de 4,86 dS/m. Elles ont été choisies par les producteurs en première année de sélection variétale participative, et peuvent être proposées à l'homologation pour une production dans les zones de salinité moyenne dans la vallée du fleuve Sénégal., Pour cela, des tests de caractérisation de DHS/VATE devront être conduits.

CHAPITRE IV
CRIBLAGE DE VARIETES DE RIZ DANS
DIFFERENTES CONDITIONS DE
SALINITE DURANT LEUR PHASE
VEGETATIVE

Article soumis à Agronomie Africaine le 15/08/2016

CHAPITRE IV : CRIBLAGE DE VARIETES DE RIZ DANS DIFFERENTES CONDITIONS DE SALINITE DURANT LEUR PHASE VEGETATIVE

I. INTRODUCTION

Le seuil de tolérance du riz (*Oryza sativa* L.) à la salinité est à 3 dS/m. Au-delà de cette valeur le rendement commence à chuter chez une bonne partie de variétés (Lutts et *al.*, 1955, Maas, 1993 et Chinnusamy et *al.*, 2005). Considéré comme une espèce végétale qui s'adapte dans des conditions de culture en milieu salé, le riz développe différentes stratégies de survie en fonction du stade de développement. En sélection variétale, la recherche de variétés tolérantes à la salinité demande une bonne maîtrise des différentes réactions du riz dans des conditions de salinité élevées. Généralement, une salinité de 4 dS/m est considérée comme moyenne et, à 8 dS/m, elle devient élevée (Rana et Mark, 2008). La réaction la plus commune aux variétés de riz, face à la salinité, est le retard de croissance (Maas, 1990). Les effets dus à la salinité varient suivant les stades de croissance (Khan et *al.*, 1997). La germination des semences de riz en milieu salé n'est pas significativement affectée jusqu'à 16,3 dS/m ; elle est cependant sévèrement empêchée à 22 dS/m (Heenan et McCaffery, 1988). La dormance des semences de riz peut être prolongée dans des conditions de salinité élevée ; elle est souvent due au stress osmotique (Munns et Tester, 2008). Le riz est plus tolérant à la salinité durant la germination que pendant les autres stades de développement (Khan et *al.*, 1997). Dans la plupart des cas, le riz devient particulièrement sensible à la salinité au stade plantule (Narale, et *al.*, 1969 ; Lenntech, 2015). L'effet majeur de la salinité à ce stade est la réduction du nombre de talles (Munns, 2008).

En Californie, une salinité aussi faible que 1,9 dS/m peut réduire significativement le poids sec des plantules et à un niveau de conductivité de 3,4 dS/m, une réduction du nombre de plants repris est observée chez une variété locale M-202 (Zeng et Shannon, 2000). Le nombre de jours à l'épiaison et à la floraison est rallongé en condition de stress de salinité (Khatum, Rizzo et Flowers, 1995).

On cherche souvent dans l'élaboration des programmes d'amélioration génétique du riz à intégrer des caractéristiques agronomiques ciblées à un niveau de tolérance à la salinité dans la variété (Boyer, 1982).

Au Sénégal, la vallée du fleuve Sénégal, située dans la partie nord du pays, constitue la zone de riziculture irriguée la plus importante. Elle doit contribuer actuellement au moins à 60 % du Programme National d'Autosuffisance en Riz. Pour atteindre cet objectif, des solutions

doivent être apportées face à l'abandon des périmètres irrigués du fait de la salinité. En effet, près de 179.765 ha de terres salées ont été recensées dans cette zone en 2008, (INP, 2008). Le développement de nouvelles variétés de riz tolérantes à la salinité peut être une stratégie permettant de récupérer certaines superficies. Le choix de variétés pour une base génétique adaptée aux conditions de salinité s'effectue souvent avec une caractérisation agronomique et physiologique suivant des niveaux de salinité à différents stades de développement des plants. Faisant suite à une activité de sélection variétale participative pour la tolérance à la salinité conduite au Mali, Sénégal et Gambie qui a permis d'avoir une liste de variétés issues de la combinaison du choix des producteurs et des résultats des analyses statistiques des paramètres de rendement; un criblage de 24 variétés en serre dans différents niveaux de salinité a été conduit. L'objectif de cet essai est de déterminer les effets de la salinité sur les caractéristiques agro morphologiques des variétés durant la phase végétative et de sélectionner celles qui sont les variétés les plus performantes en fonction de l'incidence du sel sur les paramètres étudiés.

II. MATERIEL ET METHODES

L'essai a été conduit sous serre au niveau du Centre du riz pour l'Afrique (AfricaRice, Sénégal zone Sahel), situé à Ndiaye, 16°14'N, 16°14'W, dans la région de Saint Louis, département de Dagana durant l'hivernage 2014.

MATERIEL:

Le matériel végétal est composé de 24 variétés ou lignées choisies après un criblage pour la tolérance à la salinité en Gambie, au Mali et au Sénégal et 5 témoins dont 1 témoin local sensible et 4 témoins internationaux composés de 2 témoins sensibles et 2 témoins tolérants à la salinité (Tableau 22).

Tableau 22 : Liste des variétés

N°	DESIGNATION	Pedigree
1	AGAMI	AGAMI
2	D 14	D 14
3	HASAWI	HASAWI
4	IKP	IKONG PAO
5	IR 1829-3R-89-1-1	IR 1366-120-3-1/IR 1539-111
6	IR 197-B-8-2	BLUEBELLE/TAINAN LINE 487 (T 487)
7	IR 59418-7B-21-3	IR 50404/AT 401//IR 10198-66-2
8	IR 61920-3B-22-2-1	IR 32429-47-3-2/WAGWAG
9	IR 63275-B-1-1-1-3-2	IR 68/TCCP 266-2-49-B-B-3
10	IR 65192-4B-11-3	IR 9884-54-3-1E-P1 (PSB RC 48)/KUATIK PUTIH
11	IR 66401-2B-6-1-3	IR 10206-29-2-1/IR 29337-36-3
12	IR 67076-2B-8-2	IR 10198-66-2*2/GZ 2175
13	IR 71907-3R-2-11	IR 63731-1-1-4-3-2-2/IRRI 126
14	IR 71991-3R-2-6-1	IR 5/IRRI 126
15	IR 72046-B-R-1-1-2-1-B	IR 31142-14-1-1-3-2*2/IR 31406-333-1
16	IR 72593-B-3-2-3-8	IR 20/IR 24//IR 65195-3B-13-2-3 (PSB RC 86)
17	IR 76346-B-B-10-1-1-1	IRRI 126/IR 65195-3B-13-2-3 (PSB RC 86)
18	IR 76393-2B-7-1-13-1	IR 71657-5R-B-12 PB/IRRI 126
19	Nona Bokra	Nona Bokra
20	NSIC RC 106	IR 32429-47-3-2/WAGWAG
21	SAHEL 201	IR 2071-586/BG 400-1-SLR
22	WAS 174-B-1-10	IR 4630-22-2/IR 67418-238-6-2-3-3
23	WAS 201-B-2	WAS 201
24	WAS 73-B-B-231-4	IR 4630-22-2/IR 31785-58-1-2-3-3
<u>TEMOINS</u>		
1	FL 478 tolérant	FL478
2	IR 29 sensible	IR 1561-149-1/IR 1737//IR 833-6-2-1-1
3	IR 31785 sensible	IR 31785
4	IR 4630 tolérant	PELITA I-1/POKKALI (ACC 8948)//IR 2061-464-2/IR 1820-52-2
5	SAHEL 108 local sensible	IR 30 (BPH S)/BABAWEE//IR 36

(Source BMS, 2015)

Les graines, pré germées dans des boites de pétri, ont été semées en serre, dans des seaux placées dans des bacs en ciment de 3,39 m x 89 cm x 41,5 cm de dimensions (photo 1-3).

Chaque bac contient 39 seaux dont chacun est percé sur les cotés et recouvert à l'intérieur d'un tissu coton (photo 4-5) et contient, en guise de substrat, du sol venant de la station de Fanaye (photo 6).



Photo 1 Serre contenant 4 bacs



Photo 2 : Test germination



Photo 3 : Disposition des seaux



Photo 4 : Format du seau percé



Photo 5 : Seau couvert en tissu



Photo 6 : Sel - solution

Album 1: Photos Dispositif au niveau des bacs

L'irrigation est effectuée avec de l'eau douce (pas salée) de façon indépendante dans chaque bac. Un conductimètre électrique a permis d'effectuer les mesures directes de Conductivité Electrique (CE) dans de l'eau. Le pH est mesuré au laboratoire avec un pH-mètre dans des échantillons d'eau venant de chaque bac. A l'intérieur de chaque bac, est placée une sonde permettant de relever les températures de l'eau. Une balance de précision est utilisée pour déterminer le poids du sel et des échantillons de plants ou de sol.

DISPOSITIF EXPERIMENTAL

Un dispositif augmenté « augmented design » a été utilisé au niveau de chaque bac, avec 3 blocs (rangées) de 13 seaux (chaque seau contenait une variété). Chaque rangée est constituée de 8 variétés à tester et 5 témoins répétés 3 fois au niveau de chaque rangée. Cela fait un total

de 39 seaux ((3 blocs x 8 seaux=24) + (3 répétitions x 5 variétés=15) =39). Le bac est considéré comme une localité ou un environnement avec son niveau de salinité :

- Bac 1 : 0 dS/m ou contrôle avec de l'eau douce d'irrigation ;
- Bac 2 avec un niveau de salinité de 3 dS/m ;
- Bac 3 : 6 dS/m;
- Bac 4 : 9 dS/m.

Quatre paramètres agro morphologiques ont été mesurés à la récolte et analysés. Il s'agit des paramètres suivants: nombre de plants repris, nombre de talles, hauteur, et poids secs des feuilles vertes.

Pour chaque paramètre mesuré, une réponse de la plante à la salinité ($X_{s.k}$) est calculée. L'incidence de la salinité sur les variables étudiées au niveau de chaque bac est calculée avec la formule suivante (Ahmadi et al., 2011):

$$X_{s.k} \text{ (en \%)} = (X_b - X_i) * 100 / X_i$$

Avec :

$X_{s.k}$ = incidence de la salinité sur les plants en mesurant le paramètre k .

X_i = la mesure du paramètre à un niveau de référence i où la plante ne reçoit aucun stress (condition optimum). Dans notre expérience, l'environnement de contrôle 0 est notre référence.

X_b = la mesure du paramètre à un niveau de stress b (environnement testé 3 ; 6 ou 9 dS/m)

Le logiciel de gestion des données de sélection BMS (Breeding Management System) a été utilisé pour l'arrangement et le stockage des données collectées avec des tablettes, les analyses de variances effectuées avec BV et les analyses multivariées pour la classification (K-means) effectuées avec le logiciel statistique R. Les interactions génotype et environnement (GXE) ont été étudiées pour chaque paramètre.

CONDUITE DES CULTURES

L'essai a été mis en place par semis direct à sec, à raison de trois grains par seau, le 25 octobre 2014, après les tests de germination des différentes variétés et des analyses de sol. Du semis au 21^{ème} jour, les plantules ont été irriguées avec de l'eau douce d'irrigation pour

permettre une bonne reprise. A partir de cette date, différents niveaux de salinité avec 3 dS/m, 6 dS/m et 9dS/m ont été apportés. La concentration en sel dans l'eau d'irrigation des bacs/seaux est estimée en utilisant la formule suivante (Khatun et *al.*, 1995) :

$$C = 640 CE$$

Avec *C* : concentration en sel m/l ; *CE* : Conductivité Electrique dS/m)

Pour la fertilisation, la dose vulgarisée a été appliquée, soit 128 N – 25 P – 4 K, apportée en engrais (9 – 23 – 30) et urée en deux fractions. L'étude concerne la phase végétative des différentes variétés et la récolte des plants est effectuée à 74 jours après semis.

OBSERVATIONS ET MESURES

- *Conductivité électrique (CE) en déci siemens par mètre (dS/m):*

La salinité de l'eau d'irrigation est mesurée directement avec le conductimètre électrique dans les bacs, au niveau des seaux et dans les sols, avec des fréquences variées et à différentes périodes de la semaine. Ainsi :

- au niveau des bacs, des mesures journalières sont effectuées dans chaque bac à partir de trois points choisis au hasard ;
- au niveau des seaux, trois mesures par semaine sont effectuées sur la lame d'eau dans chaque seau durant trois jours choisis dans la semaine (lundi, mercredi et vendredi);
- au niveau du sol contenu dans les seaux, des mesures sont effectuées dans le sol de chaque seau où la sonde de l'appareil conductimètre électrique est enfoncée.

- *pH*

Le pH est mesuré au laboratoire tous les lundis dans des échantillons d'eau de chaque bac.

- *Température des bacs (°C)*

La température de l'eau dans les bacs est mesurée à l'aide d'une sonde placée dans chaque bac.

- *Nombre de plants repris*

Le nombre de plants ayant survécu au stress salin est calculé en deux étapes, dont la première est effectuée 10 jours après semis et la seconde, à la récolte.

- *Nombre de talles :*

Le comptage du nombre de talles est réalisé 21 jours après semis et à la récolte (74 jours après semis).

- *Hauteur en centimètre (cm)*

La mesure de la hauteur des plants est faite deux fois à 30 jours après semis et à la récolte.

- *Poids secs des feuilles vertes en grammes (g)*

Les feuilles vertes à la récolte ont été séchées au four à 75 °C et ensuite pesées.

- *Scoring*

C'est une estimation de la réaction de la plante au stress avec des scores suivant son niveau de flétrissement et de croissance. Quatre mesures ont été effectuées suivant le manuel SES de l'IRRI.

Caractérisation des environnements

Durant tout le cycle de l'essai, les températures ont évolué entre 27 et 13 °C dans tous les bacs. Quant au pH de l'eau d'irrigation, la moyenne était de 7,29 dans les bacs, avec un minimum de 7,22 (bacs 3 et 4) et un maximum de 7,37 (bac 2).

Une analyse de variance de l'interaction seau x bac révèle un effet signification sur la conductivité électrique (CE) des seaux. Les niveaux de CE dans les seaux sont donc différents entre les bacs qui les contiennent. Les moyennes (Tableau 23) sont respectivement de 0,487 (Bac1 ou contrôle) ; 2,324 (Bac 2); 6,512 (Bac 3) et 9,582 (Bac 4) et correspondent aux niveaux de salinité recherchés.

Tableau 23 : Moyenne CE dans les bacs après l'analyse de variance de l'interaction de la salinité au niveau des seaux et les environnements (bacs).

Environnement	Minimum	Moyenne	Maximum	Héritabilité
Bac1 (3 dS/m)	2,543	3,324	4,050	0,9915
Bac2 (6 dS/m)	5,702	6,512	7,427	0,9932
Bac3 (9 dS/m)	8,144	9,582	10,601	0,9949
Bac4 (Contrôle)	0,487	0,582	0,662	0,8451

III. RESULTATS

Nombre de plants repris

Le comportement des variétés à la levée était bonne dans l'ensemble, cependant les quatre variétés HASSAWI, IR 67076-2B-8-2, NSIC RC 106 et WAS 174-B-1-10 n'avaient pas germé dans les seaux, même si les tests de germination avant le semis avaient donné de bons résultats. La comparaison des moyennes du nombre de plants repris à la récolte par environnement montre une diminution de ce paramètre, du bac de contrôle au bac 3, avec le

niveau de salinité le plus élevé correspondant à 9 dS/m (Tableau 25). Ces moyennes évoluent de 2,79 plants par variété dans l'environnement de contrôle à 2,65, puis 1,42 et enfin 0,83 respectivement dans les bacs à 3, 6 et 9 dS/m. Le calcul de l'incidence a permis ainsi d'évaluer l'effet de la salinité sur le nombre de plants repris par variété, en considérant l'environnement de contrôle comme référence. L'analyse de la variance de l'interaction du génotype et l'environnement révèle un effet significatif ($P < 0,001$) sur le nombre de plants ayant repris. Les moyennes des incidences par environnement passent de -7,77 % dans l'environnement de 3 dS/m à - 54,63% (6 dS/m) puis à -72,24 % à 9 dS/m (Tableaux 24 et 25).

Tableau 24 : Moyennes des Incidences de la salinité sur le nombre plants repris après GxE au niveau des environnements, 74 jours après semis, dans des conditions de salinité de 6 dS/m et 9 dS/m.

Genotypes	BAC3DS/M	BAC6DS/M	BAC9DS/M
AGAMI	-	-	-
D 14	0	-33,33	-66,67
FL 478	0	-77,78	-89
IKP	0	-66,67	-100
IR 1829-3R-89-1-1	0	-66,67	-100
IR 197-B-8-2	0	-33,33	-33,33
IR 29	-44,44	-66,67	-100
IR 31785	-66,67	-44,44	-100
IR 4630	0	-55,56	-78
IR 59418-7B-21-3	0	-33,33	-66,67
IR 61920-3B-22-2-1	0	-100	-100
IR 63275-B-1-1-1-3-2	0	-33,33	-33,33
IR 65192-4B-11-3	0	-50	-100
IR 66401-2B-6-1-3	0	-50	-100
IR 71907-3R-2-11	0	-100	0
IR 71991-3R-2-6-1	0	0	0
IR 72046-B-R-1-1-2-1-B	0	-33,33	-100
IR 72593-B-3-2-3-8	-33,33	-66,67	-100
IR 76346-B-B-10-1-1-1	-50	-100	-100
IR 76393-2B-7-1-13-1	0	-33,33	-33,33
Nona Bokra	0	0	-33,33
SAHEL 108	0	-66,67	-100
SAHEL 201	0	-100	-66,67
WAS 201-B-2	0	-33,33	-100
WAS 73-B-B-231-4	0	-66,67	-33,33
Moyenne	-7,77	-54,63	-72,24
Erreur standard des moyennes	3,768	5,856	7,079

Tableau 25 : Moyennes des paramètres analysés par environnement

Genotypes	Bac 4				Bac 1				Bac 2				Bac 3			
	Tal	Pl	HT	NbFV	Tal	Pl	HT	NbFV	Tal	Pl	HT	NbFV	Tal	Pl	HT	NbFV
AGAMI	7	1	77	26	5	1	64	10	-	-	-	-	-	-	-	-
D 14	4,5	3	74	17,5	4	3	70	8,67	3	2	55	6	3,5	1	57	6,5
FL 478	4,9	3	92,7	13,05	4,2	3	90	8,89	4,2	0,67	83,7	8,67	0,67	0,33	23,3	2
IKP	7	3	79	17	5	3	65	7,67	2	1	60	3	0	0	0	0
IR 1829-3R-89-1-1	8	3	85	36	3	3	71	7	-	-		0	4	1	52	7
IR 197-B-8-2	5	3	74	17,67	4	3	76	10,67	3	2	51	3,5	3	2	56	1,67
IR 29	6,2	3	74,7	24,5	3,8	1,67	72,67	9,67	0,8	1	20	1,56	0	0	0	0
IR 31785	9,2	3	79	28,67	4,5	1	73,67	10,72	1,3	1,67	17,7	1,67	0	0	0	0
IR 4630	5,3	3	73,3	10,78	4,6	3	70,67	16,44	1,9	1,33	58,3	3,67	2,33	0,66	36	4,67
IR 59418-7B-21-3	6,5	3	83	17,5	6	3	82	16	2,3	2	60	5,33	2,5	1	64	16
IR 61920-3B-22-2-1	5,5	2	79	17	4,3	3	70	9	0	0	0	0	0	0	0	0
IR 63275-B-1-1-1-3-2	3	3	76	11,67	3,7	3	72	8,67	2	2	55	4	2	2	50	7,5
IR 65192-4B-11-3	6	2	76	21	4	3	71	11,33	5	1	50	6	0	0	0	0
IR 66401-2B-6-1-3	3,5	2	49	12	4	2	80	7,5	1	1	29	1	0	0	0	0
IR 71907-3R-2-11	6	3	75	17,3	3,3	3	76	8,33	0	0	0	0	2	3	58	2
IR 71991-3R-2-6-1	5,7	3	80	12	4,3	3	72	11	3	3	61	6,67	3	3	65	7,33
IR 72046-B-R-1-1-2-1-B	4,3	3	71	14	3,3	3	80	7,67	1	2	42	0,5	0	0	0	0
IR 72593-B-3-2-3-8	4,7	3	89	15,67	3,5	2	83	11,5	3	1	63	4	0	0	0	0
IR 76346-B-B-10-1-1-1	7	2	96	32	5	1	79	20	0	0	0	0	0	0	0	0
IR 76393-2B-7-1-13-1	6	3	68	22,5	7,5	3	74	13,5	5	2	59	8	4	2	59	6
Nona Bokra	3,3	3	113	20	4	3	109	11	4	3	72	6	2,5	2	66	5
SAHEL 108	6,3	2	77	21,67	5,6	2	75,33	15,11	0,7	0,67	15,3	0,33	0	0	0	0
SAHEL 201	5,5	3	83	11	4	3	77	7	0	0	0	0	1	1	0	0
WAS 201-B-2	7	3	74	19,5	4	3	67	8,33	2,5	2	65	4,5	0	0	0	0
WAS 73-B-B-231-4	11	3	72	38	7	3	77	20	7	1	56	16	4,5	2	60	6,5
Moyenne	5,94	2,72	78,79	19,76	4,46	2,59	75,89	11,07	2,29	1,32	42,30	3,61	1,46	0,87	26,93	2,89

Le nombre de talles par plant

Le nombre de talles par plant dans les environnements de contrôle, 3 dS/m, 6dS/m et 9 dS/m a évolué en moyenne, respectivement de 5,94 ; 4,46 ; 2,29 et 1,46 (Tableau 25). Cette diminution du tallage suivant le niveau de salinité croissant permet de calculer la réponse de chaque variété à la salinité. L'analyse de variance de l'interaction géotypes et environnement révèle un effet significatif sur l'incident de la salinité sur le tallage. Le classement de cet incident par variété au niveau de chaque environnement est présenté au tableau 26.

Tableau 26 : Incidence du niveau de salinité sur le nombre de talles de chaque variété après analyse GXE.

Genotypes	3 dS/m		6 dS/m		9 dS/m	
	Incidence	Classe	Incidence	Classe	Incidence	Classe
AGAMI	-28,57	9	-		-	
D 14	-11,11	19,5	-33,33	22	-22,22	25
Nona Bokra	0	24,5	0	25	-37,5	24
IR 197-B-8-2	-20	16	-40	18	-40	23
IR 71991-3R-2-6-1	-24,56	13	-47,37	17	-47,37	22
IR 76393-2B-7-1-13-1	-6,25	23	-37,5	19	-50	20
IR 63275-B-1-1-1-3-2	-7,5	22	-50	16	-50	20
IR 4630	-13,21	18	-64,15	15	-56,04	18
WAS 73-B-B-231-4	-36,37	6	-36,36	20	-59,1	17
IR 59418-7B-21-3	-7,69	21	-64,61	13	-61,54	16
IR 71907-3R-2-11	-45	3	-	3,5	-66,67	14
SAHEL 201	-27,27	11	-	3,5	-100	5,5
FL 478	-14,286	17	-14,28	24	-86,33	11
IR 1829-3R-89-1-1	-62,5	1	-	3,5	-81,82	12,5-
IR 72046-B-R-1-1-2-1-B	-23,26	14	-76,74	10	-100	5,5
IR 61920-3B-22-2-1	-21,82	15	-81,82	9	-100	5,5
IR 31785	-51,09	2	-85,87	8	-100	5,5
IR 65192-4B-11-3	-33,33	7	-16,67	23	-100	5,5
IR 72593-B-3-2-3-8	-25,53	12	-36,17	21	-100	5,5
WAS 201-B-2	-42,86	4	-64,28	14	-100	5,5
IKP	-28,57	9	-71,43	12	-100	5,5
IR 66401-2B-6-1-3	0	24,5	-75	11	-100	5,5
IR 29	-38,71	5	-87,1	7	-100	5,5
SAHEL 108	-11,11	19,5	-88,89	6	-100	5,5
IR 76346-B-B-10-1-1-1	-28,57	9	-100	3,5	-100	5,5
Moyenne générale	-24,37		-55,78		77,44	
Erreur standard moyenne	3,191		6.070		5.091	
Variance	254,6		884.2		622.2	

Hauteur du plant

La hauteur des plants à 74 jours après semis a évolué en moyenne de 78,79 cm au niveau du contrôle à 75,89 ; 43,30 et puis 25,93 cm, respectivement à 3 ; 6 et 9 dS/m (Tableau 25). Cette diminution de la hauteur moyenne des variétés par environnement suivant le niveau de salinité ne permet pas de comparer la réponse de chaque variété. L'incidence de la salinité sur la hauteur des plants est ainsi calculé pour analyser l'expression de chaque variété sur la salinité. La classification différente de l'incidence de la salinité sur la hauteur des plants illustre l'effet significatif de l'interaction GXE (Voir Tableau 27).

Tableau 27 : Incidents moyens du niveau de salinité sur la hauteur des plants après analyse GXE.

Genotypes	3 dS/m		6 dS/m		9 dS/m	
	Incident	Classe	Incident	Classe	Incident	Classe
AGAMI	-16,88	4	-100	3,5	-100	7
D 14	-5,40	14	-25,68	18	-22,97	19
FL 478	-2,91	19	-9,79	25	-74,86	14
IKP	-17,72	2	-24,05	19	-100	7
IR 1829-3R-89-1-1	-16,47	5	-	3,5	-38,82	16
IR 197-B-8-2	-2,54	21	-31,08	14	-24,32	18
IR 29	-2,72	20	-73,23	9	-100	7
IR 31785	-6,75	11	-77,59	8	-100	7
IR 4630	-3,59	18	-20,46	22	-50,89	15
IR 59418-7B-21-3	-1,205	25	-27,71	16	-22,89	20
IR 61920-3B-22-2-1	-11,39	7	-100	3,5	-100	7
IR 63275-B-1-1-1-3-2	-5,26	15	-27,63	17	-34,21	17
IR 65192-4B-11-3	-6,58	13	-34,21	13	-100	7
IR 66401-2B-6-1-3	-2,44	22	-40,82	11	-100	7
IR 71907-3R-2-11	-1,30	24	-	3,5	-22,67	21
IR 71991-3R-2-6-1	-12,19	6	-23,75	20	-18,75	22
IR 72046-B-R-1-1-2-1-B	-9,09	9	-40,84	10	-100	7
IR 72593-B-3-2-3-8	-6,741	12	-29,21	15	-100	7
IR 76346-B-B-10-1-1-1	-17,71	3	-100	3,5	-100	7
IR 76393-2B-7-1-13-1	-3,90	16	-13,23	23	-13,23	24
Nona Bokra	-30,43	1	-36,52	12	-8,70	25
SAHEL 108	-2,17	23	-80,12	7	-100	7
SAHEL 201	-7,23	10	-100	3,5	-100	7
WAS 201-B-2	-10,67	8	-12,16	24	-100	7
WAS 73-B-B-231-4	-3,75	17	-22,22	21	-16,67	23
Moyenne générale	-8,28		-45,66		-64,54	
Erreur standard de la moyenne	1,41		6,78		7,65	

Nombre de feuilles vertes à 74 jours après semis

Après un cycle végétatif de 74 jours, le nombre moyen de feuilles vertes par plant des variétés au niveau des environnements de contrôle, 3 dS/m ; 6 dS/m et 9 dS/m a varié respectivement de 19,76 ; 11,07 ; 3,61 et 2,89 (Tableau 25). La classification de l'incident de la salinité sur le nombre de feuilles vertes (Tableau 28) révèle l'effet significatif de l'interaction GXE. La réponse des variétés à la salinité suivant le nombre de feuilles vertes par plant est différente d'un environnement à l'autre ; elle est aussi différente entre les variétés.

Tableau 28 : Incident des niveaux de salinité sur le nombre de feuilles vertes par plant

Genotypes	3DS/M		6DS/M		9DS/M	
	Inc.FV	Classe	Inc.FV	Classe	Inc.FV	Classe
AGAMI	-61,5	23	-100	22,5	-100	19
D 14	-50,5	18	-65,7	5,5	-62,9	6
FL 478	-31,9	7	-33,6	1	-84,7	10
IKP	-54,9	20	-82,3	14	-100	19
IR 1829-3R-89-1-1	-80,6	25	-100	22,5	-80,6	8
IR 197-B-8-2	-39,6	11	-80,2	13	-90,6	12
IR 29	-60,5	22	-93,6	16	-100	19
IR 31785	-62,6	24	-94,2	17	-100	19
IR 4630	52,6	1	-66	7	-56,7	5
IR 59418-7B-21-3	-8,6	3	-69,5	8	-8,6	1
IR 61920-3B-22-2-1	-47,1	16	-100	22,5	-100	19
IR 63275-B-1-1-1-3-2	-25,7	4	-65,7	5,5	-35,7	2
IR 65192-4B-11-3	-46,0	15	-71,4	10	-100	19
IR 66401-2B-6-1-3	-37,5	9,5	-86,7	15	-100	19
IR 71907-3R-2-11	-51,9	19	-100	22,5	-88,5	11
IR 71991-3R-2-6-1	-8,3	2	-44,4	3	-38,9	3
IR 72046-B-R-1-1-2-1-B	-45,2	14	-96,4	18	-100	19
IR 72593-B-3-2-3-8	-26,6	5	-74,5	11	-100	19
IR 76346-B-B-10-1-1-1	-37,5	9,5	-100	22,5	-100	19
IR 76393-2B-7-1-13-1	-40	12	-40,7	2	-55,6	4
Nona Bokra	-45	13	-70	9	-75	7
SAHEL 108	-30,3	6	-98,5	19	-100	19
SAHEL 201	-36,4	8	-100	22,5	-100	19
WAS 201-B-2	-57,3	21	-76,9	12	-100	19
WAS 73-B-B-231-4	-47,4	17	-57,9	4	-82,9	9
Moyenne	-39,2		-78,7		-82,4	
Erreur standard des moyennes	5.020		4.038		5.079	

Classification K-means

L'analyse multivariée des incidents en moyennes des paramètres étudiés permet de faire une classification par la méthode K-means. Toutes les variétés ont été réparties dans quatre classes suivant les moyennes d'incidents calculées (voir tableaux 29 et 30).

Tableau 29 : Moyennes des incidents sur paramètres

Classe	% d'incident de la salinité sur le nombre de talles par plant	% d'incident de la salinité sur le nombre de feuilles vertes par plant	% d'incident de la salinité sur le nombre de plants repris par variété	% d'incident de la salinité sur la hauteur
1	-68,31	-82,48	-64,20	-65,45
2	-76,19	-79,17	-83,33	-72,57
3	-58,13	-77,39	-50,00	-39,73
4	-34,62	-47,66	-27,79	-19,89

Tableau 30 : Classification K-means

CLASSE 1 (témoins sensibles IR 29; IR 31785 sahel108)	CLASSE 2	CLASSE 3	CLASSE 4 (témoins tolérants FL 478; IR 4630)
AGAMI	IR 76346-B-B-10-1-1-1	IKP	D 14
IR 61920-3B-22-2-1		IR 1829-3R-89-1-1	IR 197-B-8-2
SAHEL 201		IR 65192-4B-11-3	IR 59418-7B-21-3
		IR 66401-2B-6-1-3	IR 63275-B-1-1-1-3-2
		IR 71907-3R-2-11	IR 71991-3R-2-6-1
		IR 72046-B-R-1-1-2-1-B	IR 76393-2B-7-1-13-1
		IR 72593-B-3-2-3-8	Nona Bokra
		WAS 201-B-2	WAS 73-B-B-231-4

L'AMMI montre les effets majeurs du génotype, de l'environnement et les interactions. Le diagramme double de projections répartit les variétés suivant les environnements (figure 12).

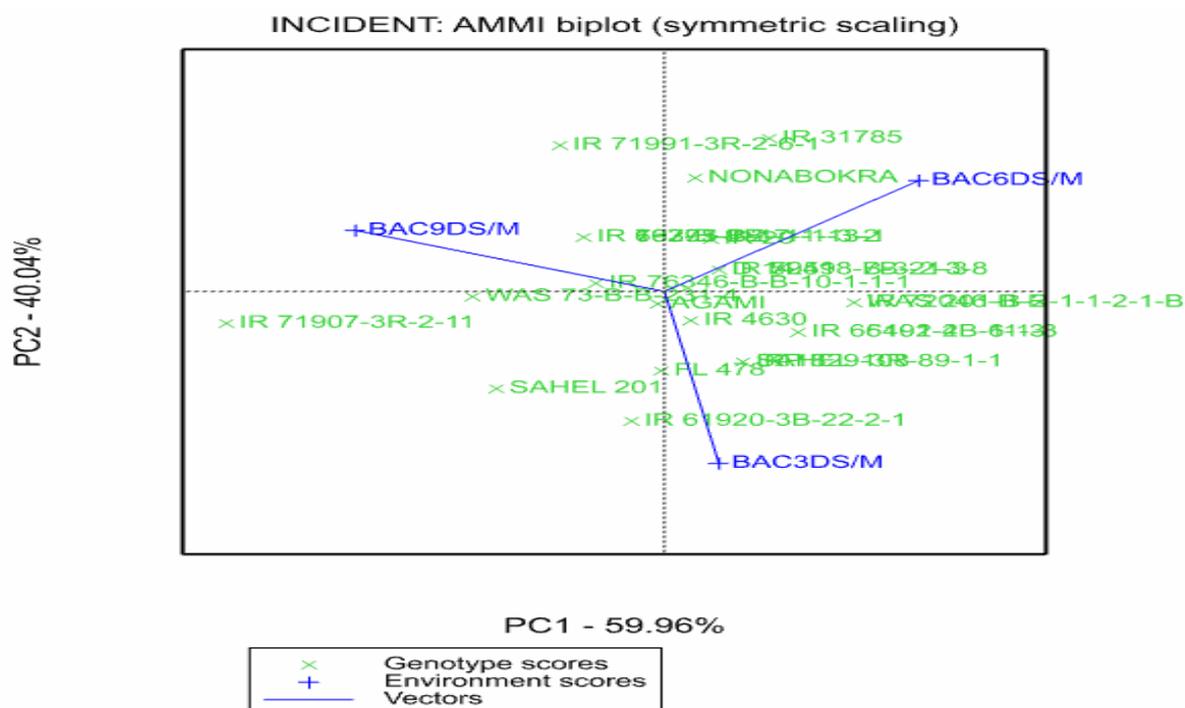


Figure 12 : AMMI

Observations visuelles

Au niveau des feuilles vertes de certaines variétés des bacs 2 et 3, des dépôts de sel ont été observés (Album 2).



Album 2 : Présence sel sur les gaines - Nona Bokra (étiquette 14) et IR 71991-3R-2-6-1 (étiquette 8).

IV. DISCUSSIONS

Variation de la Température (°C) et du pH

La variation des températures durant tout le cycle de l'essai était bonne pour un bon développement des plants. En effet, le riz est une plante thermophile qui, à des températures de 25 à 35°C (*Indica*) ou de 20 à 33°C (*Japonica*), trouve des conditions optimales pour faire la photosynthèse (Yoshida, 1988). La variation du pH aussi n'a pas eu d'influence négative sur le développement des plants. En fait, le pH des sols salins sont inférieurs à 8,6 (Tester et Davenport, 2003).

Evolution des niveaux de salinité

Le contrôle de l'évolution des niveaux de salinité, en ajustant avec du sel dans les bacs, a donné de bons résultats par rapport à l'objectif qui était fixé d'avoir des niveaux de CE respectifs de 3 ; 6 et 9 dS/m. Les niveaux de salinité obtenus dans les bacs sont statistiquement différents avec les moyennes, après analyse de la variance :

- bac 1, avec une CE de 0,47 dS/m, considéré comme contrôle ;
- bac 2, avec une CE de 3,2 dS/m, l'environnement le plus faible en salinité après le contrôle, où les plants devraient développer les premiers effets de salinité. Pour rappel le seuil de tolérance du riz à la salinité est de 3 dS/m et à ce stade même il est sensible (Lutts, et *al.*, 1995 ; Maas, 1996 ; Chinnusamy et Jagendorf, 2005)
- bacs 3 et 4, avec des CE respectivement de 6,23 et 9,37 dS/m ont des niveaux de salinité plus élevés permettant de mieux cribler les performances des variétés.

Cette caractérisation des environnements a permis de fixer les conditions du stress de salinité appliquée pour réaliser cette expérimentation. Les critères majeurs souvent cités pour caractériser un sol salin sont : une conductivité électrique supérieure ou égale à 4 dS/m, un pH inférieur à 8,5 et un pourcentage d'échange de sodium supérieur ou égal à 15 (Rana et Mark, 2008).

Effets de la salinité sur les variables étudiées

Nombre de plants repris

Sur les 4 environnements testés, on a observé une différence significative inter environnementale et également une différence inter variétale.

Au niveau de l'environnement à 3 dS/m, considéré comme le niveau de salinité le plus faible, l'incidence moyenne de la salinité est de - 7,77% et seules quatre variétés ont montré une sensibilité à la salinité. Il s'agit des variétés IR 29, IR 31785, IR 72593-B-3-2-3-8 et IR 76393-2B-B-10-1-1-1. Les deux premières variétés sont reconnues sensibles à la salinité au niveau international., La lignée IR 72593-B-3-2-3-8 qui fait partie des variétés choisies par les producteurs lors d'une première sélection variétale participative pour l'adaptation à la salinité, s'est révélée sensible en phase juvénile.

Dans le bac de 6 dS/m, l'incidence moyenne de la salinité sur le taux de reprise des plants est de -54,63 %, seules deux variétés Nona Bokra et IR71991-3R-2-6-1 n'ont pas subi l'effet de salinité sur la reprise de plants. Les variétés D14, IR 197-B-8-2, IR 59418-7B-21-3, IR 63275-B-1-1-1-3-2, IR 72046-B-R-1-1-2-1-B, IR 76393-2B-7-1-13-1 et WAS 201-B-2 ont eu un bon comportement à la dose de 6,23 dS/m appliquée dans le bac 2 durant tout le cycle végétatif des plants.

Par contre, dans le bac 3 (9 dS/m), seules 10 variétés testées et deux témoins tolérants IR4630 et FL478 ont survécu à la dose de 9,37 dS/m appliquée durant tout le cycle végétatif des plants. L'incidence moyenne de ce niveau de salinité est à -72,24 % sur le nombre de plants ayant survécu.

La capacité qu'a une plante à se maintenir dans des conditions de salure croissante est considérée comme une tolérance à la salinité (Hayward et Wadleigh, 1949). Les 12 variétés ayant survécu à une salinité de moyenne 9,37 dS/m ont une tolérance avérée à la salinité en phase végétative.

Nombre de talles par plant

Quant à l'incidence de la salinité sur le tallage des variétés, il évolue de -24,37 à -55,78% du niveau de 3 dS/m à 6 dS/m puis à -77,4 % dans l'environnement de 9 dS/m. Cette diminution du tallage dans l'ensemble des variétés suivant le niveau croissant de la salinité, démontre l'effet du sel sur le tallage du riz.

Au niveau du bac de 3 dS/m, l'effet de la salinité sur les plants commence à se faire sentir presque sur toutes les variétés. Nona Bokra est la seule variété qui n'a pas subi l'effet de la salinité dans les deux environnements de 3 et 6 dS/m. Les variétés témoins sensibles IR 29, IR 31785 et Sahel 108 ont subi plus de 85 % de pertes de talles à 6 dS/m. Au total, 9 variétés testées ont subi moins de 50 % de perte de talles, comparées au contrôle à 6 dS/m : Nona Bokra, IR 65192-4B-11-3, D 14, IR 72593-B-3-2-3-8, WAS 73-B-B-231-4, IR 76393-2B-7-

1-13-1, IR 197-B-8-2 et IR 71991-3R-2-6-1. De même, parmi les variétés ayant survécu à 9 dS/m, 6 ont eu moins de 50% de perte de talles, performance meilleure que le témoin IR 4630 ; il s'agit de D14, Nona Bokra, IR 197-B-8-2, IR 71991-3R-2-6-1, IR 76393-2B-7-1-13-1 et IR 63275-B-1-1-1-3-2.

Hauteur des plants

La variation de la hauteur des plants est aussi influencée par les niveaux de salinité. Les incidents de la salinité aux niveaux 3, 6 et 9 dS/m sur la hauteur des plants sont en moyenne respectivement -8,28, -45,66 et -64,54%. Cette évolution traduit une réduction de la croissance des plants suivant l'augmentation du niveau de salinité. Une salinité modérée (4 dS/m) affecte la croissance du riz (Singh et al., 2013).

Au niveau du bac 9 ds/m, 10 variétés ont développé des incidents plus faibles que les témoins tolérants IR 4630 et FL478 ; il s'agit de : Nona Bokra ; IR 76393-2B-7-1-13-1 ; WAS 73-B-B-231-4 ; IR 71991-3R-2-6-1 ; IR 71907-3R-2-11 ; IR 59418-7B-21-3 ; D14 ; IR 197-B-8-2 ; IR 63275-B-1-1-1-3-2 et IR 1829-3R-89-1-1.

Nombre de feuilles vertes

L'effet de la salinité sur les feuilles vertes se manifeste à partir du niveau de salinité de 3 dS/m. Les incidents de la salinité sur les feuilles des plants aux niveaux 3, 6 et 9 dS/m sont respectivement de -39,2, -78,7 et 82,4 %. Cette évolution traduit le dessèchement des feuilles suivant le niveau croissant de salinité. En condition de salinité, la croissance des feuilles diminue et peut même annihiler la formation de nouvelles feuilles (Gregorio et al, 2002). A 9 dS/m, 10 variétés se sont comportées comme les témoins tolérants IR 4630 et FL478 ; il s'agit de : Nona Bokra ; IR 71991-3R-2-6-1 ; IR 76393-2B-7-1-13-1 ; IR 59418-7B-21-3 ; WAS 73-B-B-231-4 ; D 14 ; IR 197-B-8-2 ; IR 1829-3R-89-1-1 et IR 63275-B-1-1-1-3-2 et IR 71907-3R-2-11.

Le nombre de plants repris, la hauteur, le nombre de talles et le nombre de feuilles vertes par plant sont réduits suivant le niveau croissant de salinité. Ces réactions du riz se traduisent par un retard de croissance, un enroulement, puis un dessèchement des anciennes feuilles (Singh et al., 2008). De nombreux travaux expliquant les effets d'un stress de salinité sur le riz indiquent les paramètres liés à la croissance des plants tels que : la biomasse des plantules, la surface foliaire, le nombre de talles et la hauteur des plants sont réduits par la salinité (Flowers et Yeo, 1981 ; Zeng et Shannon, 2000 ; Lenntech, 2015). En général, au niveau des céréales, l'effet majeur de la salinité sur la partie aérienne des plants se traduit par la réduction

du nombre de talles par plant ; la croissance des plantules est plus affectée que celle des racines (Pearson et Bernstein, 1959). En outre, au niveau physiologique, les effets néfastes de la salinité sur la croissance des plantes sont généralement associés au faible potentiel osmotique de la solution du sol et au niveau élevé de toxicité du sodium (et du chlore pour certaines espèces) qui provoquent des perturbations multiples sur le métabolisme, la croissance et le développement des plantes aux niveaux moléculaire, biochimique et physiologique (UNESCO, 1952 ; Pearson et Bernstein, 1959 ; Winicov, 1998 ; Singh et *al.*, 2013).

Analyse multivariée : Classification « K-means »

Le classement des incidents de la salinité sur les paramètres agronomiques étudiés permet de mieux comprendre les stratégies des variétés dans différentes conditions de salinité. Quatre classes ont été choisies pour la classification par la méthode de « K-means » en fonction des moyennes d'incidents du nombre de plants repris, nombre de talles, la hauteur et le poids sec des feuilles vertes.

Cette répartition fait ressortir :

- les 8 meilleures variétés qui ont pu se développer dans l'environnement de 9 dS/m en classe 4, avec les deux variétés témoins tolérantes FL 478 et IR 4630 ;
- une classe 3 moyennement tolérante avec 8 variétés ;
- la variété IR 76346-B-B-10-1-1-1 qui compose la classe 2 est moyennement sensible à la salinité ;
- les variétés sensibles à la salinité, confirmées par la présence de trois témoins sensibles (Sahel 108, IR 31785 et IR 29) en classe 1.

Les effets de la salinité sur l'expression de la reprise de plants, du tallage, de la croissance et du nombre de feuilles vertes des plants ont permis d'identifier 8 variétés prometteuses pour leur tolérance à la salinité.

V. CONCLUSION

Les réactions agro morphologiques des variétés testées dans différents niveaux de salinité ont permis de confirmer certains résultats de recherche sur les effets de la salinité sur le riz. Ces expressions des variétés en conditions de salinité qui ont permis de distinguer quatre classes en fonction du niveau de salinité, dont une classe de variétés prometteuses, constituent une première étape de caractérisation agro physiologique. Certaines variétés, qui avaient été

choisies par les producteurs, ont confirmé leur performance. Il s'agit de : D14, WAS 73-B-B-231-4 et IR 59418-7B-21-3 et peuvent être considérées comme les premières élites.

La réaction du riz à la salinité est un sujet complexe à étudier qui dépend de la variété, de l'environnement et du stade de développement du plant. Au Sénégal, en milieu paysan, le niveau de salinité dans les parcelles est très difficile à gérer.

Dans l'écologie irriguée, il y a souvent de fortes remontées salines qui dépendent des facteurs climatiques, du mode d'irrigation de la parcelle.

Dans l'écologie de bas-fond, la non maîtrise de l'eau favorise la remontée du sel parfois à des niveaux inquiétants ; en fin d'hivernage avec la diminution des pluies cette remontée saline entraîne des taux de stérilité importants. Les variétés traditionnelles, mieux adaptées y sont encore cultivées et semblent difficiles à remplacer. Les nouvelles variétés développées pour la tolérance à la salinité doivent être accompagnées par des pratiques innovantes qui permettent de gérer le niveau de salinité de la parcelle du producteur. Dans la vallée du Fleuve Sénégal, les drainages fréquents et l'utilisation de « *phosphogypse* » comme amendement sont pratiqués par certains producteurs de riz.

Cette étude de caractérisation va se poursuivre au niveau physiologique, avec les teneurs en Na^+ et K^+ dans les différentes parties de la plante, pour étudier les mécanismes déployés par chaque variété pour s'adapter dans ces conditions de salinité. Une évaluation agronomique en milieu réel durant le cycle complet, avec les mêmes environnements permettra de confirmer les résultats.

CHAPITRE V

MECANISMES PHYSIOLOGIQUES DE
TOLERANCE A LA SALINITE DE VARIETES
DE RIZ

Article soumis à CONNAISSANCE SAVOIR le 15/08/2016

CHAPITRE V : MECANISMES PHYSIOLOGIQUES DE TOLERANCE A LA SALINITE DE VARIETES DE RIZ

I. INTRODUCTION

La salinité fait partie des problèmes importants qui affectent l'agriculture au niveau mondial, on prévoit dans les prochaines décennies qu'elle fera partie des problèmes les plus sérieux qui entravent les productions végétales (FAO, 2015). Pour combattre ce phénomène, la recherche de plantes cultivées tolérantes doit être accentuée, afin de développer ces zones marginales. Ainsi, l'utilisation à la fois des différentes techniques de manipulations génétiques et des approches traditionnelles de sélection est nécessaire pour développer de nouvelles variétés tolérantes (Yamaguchi & Blumwald, 2005). Considéré comme une espèce végétale modérément sensible aux conditions de culture en milieu salé, le riz développe différentes stratégies de survie en fonction de ses stades phénologiques. Plusieurs approches ont été développées pour obtenir des variétés de riz tolérantes à la salinité, notamment, le criblage de variétés déjà existantes pour exploiter la variabilité génétique naturelle, le développement de nouvelles lignées avec les approches de sélection et récentes et la génération des plantes transgénique (introduction de nouveaux gènes ou modification de l'expression des gènes), avec une tolérance accrue au stress de salinité qui a été la méthode de choix des entreprises (Yamaguchi & Blumwald, 2005).

La variabilité des critères étudiés permet de distinguer deux catégories de tests :

- Une première catégorie de tests qui s'adressent au comportement de la plante, à savoir, vigueur, hauteur, tallage, nombre de feuilles...
- Une deuxième catégorie qui repose sur le fait que certains traits précis de la biochimie et de la physiologie cellulaire sont directement corrélés à la tolérance au stress, tels que la perméabilité cellulaire, l'accumulation de substances caractéristiques des stress, l'induction des protéines spécifiques, la perturbation des photosystèmes,... La possibilité de faire acquérir la résistance au sel ou au stress hydrique par des cellules ou tissus en culture supporte l'hypothèse que ce comportement physiologique est sous la dépendance de paramètres cellulaires (Ben-Hayyim & Kochba, 1983 ; Benzel et al., 1987 ; Benzel et al., 1988 ; Zid & Grignon, 1991).

Une des premières études conduites en milieu contrôlé avait rapporté que les effets néfastes du sel sur le riz étaient dus, à la fois, à un faible potentiel osmotique et une accumulation des ions de chlore (Iwaki et al., 1953 ; Singh et al., 2008). Ensuite, dans les années 80, des chercheurs ont montré que ces effets néfastes de la salinité sur le riz étaient dus à des concentrations excessives des ions sodium (Na) et de chlore (Clarkson & Hanson 1980) et que le déséquilibre Na^+/K^+ affectait le rendement en grains (Devitt et al., 1981). D'autres chercheurs ont, par la suite, établi la relation entre les absorptions

de potassium et de sodium et les performances de la plante dans des conditions de salinité (Bohra & Dörffling, 1993 ; Rajarathinam et *al.*, 1988). Les mécanismes typiques de tolérance à la salinité du riz liés à l'expulsion ou à la réduction des ions Na⁺ et l'augmentation des ions K⁺ pour maintenir un bon ratio Na⁺/K⁺ au niveau des tiges ont été démontrés (Hasegawa, 2000). En 2000, 21 génotypes de riz ont été criblés pour leur tolérance à la salinité en se basant sur le ratio K⁺/Na⁺ au niveau des feuilles (Asch, 2000) et, en 2005, différents génotypes de riz ont été classés suivant leur tolérance à la salinité en se basant sur leur rendement en grains et le ratio Na⁺/K⁺ dans des zones côtières (Pandey & Srivastava, 1991). Différentes accessions de riz à rendement élevé et tolérantes à la salinité ont enregistré une faible valeur du ratio Na⁺/K⁺ et des rendements élevés (Zid & Grignon, 1991).

Les différentes stratégies pour s'adapter dans des conditions de salinité des plantes sont décrites par l'IRRI (International Rice Research Institute):

1. exclusion : c'est une restriction de l'entrée des ions toxiques au niveau des racines ;
2. transfert des ions toxiques au niveau des feuilles âgées ou dans la tige ;
3. évacuation (excrétion) du sel, à travers des glandes ou des poils (surtout chez les halophytes) ;
4. séquestration des ions toxiques au niveau de la vacuole (Borsani et *al.*, 2003 ; Zheng et *al.*, 2003 ; Munns, 2005 ; Apse & Blumwald, 2007 ; Hanana, 2011 ; IRRI, 2015),.

Les mécanismes, tels que l'évitement de l'entrée de Na⁺ dans les parties aériennes, l'accumulation de Na⁺ dans les gaines et le maintien de la croissance ont été mis en évidence chez la variété Nona Borka (Le Quang, 2004).

Le criblage de 24 variétés dans des conditions contrôlées de salinité durant leur phase de végétation qui a permis de déterminer les réactions agro morphologiques, est suivi ici par l'étude des mécanismes physiologiques des différentes variétés citées. L'étude a pour objectif de déterminer la répartition du sodium dans les racines, les limbes et les gaines des feuilles mortes et vertes dans différentes conditions de salinité et de déterminer les relations entre les comportements morphologiques et les concentrations en sodium et potassium au niveau des différentes parties aérienne et souterraine de la plante. Après une explication de la méthodologie employée, les résultats et discussions seront présentés.

II. MATERIEL ET METHODES

Le matériel végétal est composé des 29 variétés de l'essai sur l'étude agro morphologique de la tolérance à la salinité avec 4 niveaux de salinité : 0 ; 3 ; 6 et 9 ds/m. Les échantillons ont été prélevés sur les variétés récoltées au niveau de chaque bac. Les prélèvements des échantillons des racines et des parties aériennes ont été effectués à la récolte à 74 jours après semis. La salinité

moyenne au niveau des bacs, contrôlée avec une solution de sel ordinaire est de 2,32 ; 6,51 et 9,58 dS/m respectivement dans les bacs de numéro 2 ; 3 et 4.

Les échantillons ont été analysés au niveau du Laboratoire de sol et plante de la Station AfricaRice de Saint Louis.

Détermination des concentrations de sodium et potassium

Préparation de la solution

Pour la récolte des échantillons, les plants sont déterrés soigneusement du seau. A l'aide d'un sécateur les racines sont séparées de la partie aérienne et immédiatement nettoyées du sable avant le séchage. Les feuilles mortes et vertes sont ensuite soigneusement séparées de la tige et le limbe détaché de la gaine pour chaque feuille. Tous les échantillons sont ensuite séchés au four à 70 °C pendant 48 heures avant d'être broyés et pesés. Dans chaque échantillon 1 gramme est prélevé et mis dans une porcelaine pour une calcination au four à 500 °C durant 5 heures. Après refroidissement des porcelaines à température ambiante, 1 ml d'eau distillée est ajouté pour humidifier et refroidir. 25 ml de HCl 1N sont par la suite ajoutés pour détruire la matière organique. L'incubation des échantillons suit pendant 24 h avant de filtrer la solution dans des fioles de 100 ml et jaugée avec de l'eau distillée. La solution devient prête pour passer au niveau de la flamme photométrique jenway PEP7.

Mesures

Une gamme d'étalonnage avec les solutions standards (blank = solution neutre contenant que du HCl 1N) est d'abord définie pour le sodium et le potassium afin de déterminer l'équation linéaire de la courbe tendancielle. La calibration peut ainsi démarrer par échantillon et les données obtenues par l'appareil sont projetées sur l'axe des abscisses avec l'équation de la courbe d'étalonnage (tendancielle).

III. RESULTATS

Teneur en sodium (Na⁺)

Dans les racines

La concentration de sodium (μg de Na⁺ par gramme de poids sec de racine) évolue suivant le niveau de salinité. Dans l'environnement Na+1 caractérisé par une moyenne de salinité 2,3 dS/m du semis au 74 ème jour après, la concentration moyenne de sodium des variétés au niveau racinaire est de 16,3 $\mu\text{g/g}$ de poids sec (PS). Cette moyenne augmente jusqu'à 52,9 $\mu\text{g/g}$ PS au niveau l'environnement Na+2 qui a une moyenne salinité 6,5 dS/m. A partir de cet environnement, la concentration en sodium jusqu'à 46,46 $\mu\text{g/g}$ PS dans l'environnement Na+3 de 9,6 dS/m malgré

l'augmentation de la salinité (Figure 13). Entre les deux premiers environnements (2,3 et 6,5 dS/m) la teneur en sodium des racines a augmenté sur l'ensemble des variétés. Dans le troisième environnement d'une moyenne salinité de 9,6 dS/m les variétés survécues se répartissent en deux groupes:

- Groupe 1 : Représenté par les variétés FL 478 ; IR 59418-7B-21-3; IR 63275-B-1-1-1-3-2; IR 71907-3R-2-11 et IR 72046-B-R-1-1-2-1-B. Dans l'évolution de la concentration de sodium au niveau des racines de ces variétés, une diminution a été notée.
- Groupe 2 : Les variétés IR 4630 ; D 14 ; IR 1829-3R-89-1-1; NONA BOKRA; WAS 73-B-B-231-4 ; IR 76393-2B-7-1-13-1 et IR 197-B-8-2 qui ont survécu dans l'environnement de Na³ avec une augmentation de la concentration de Na⁺ dans les racines.

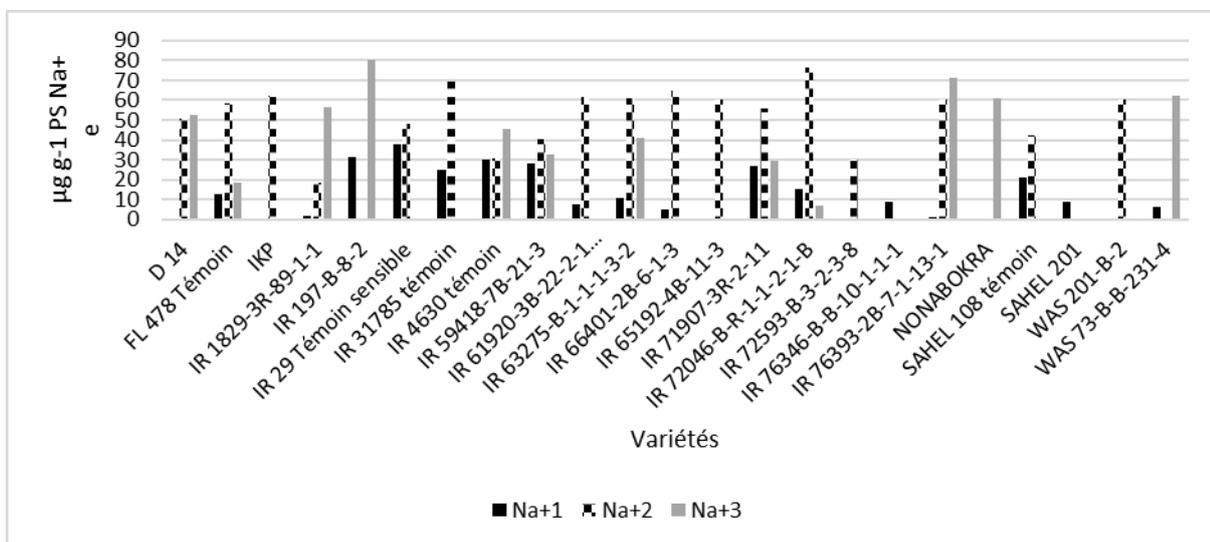


Figure 13 : Evolution de la teneur en sodium des racines au niveau des différents bacs (Na¹ ; N² ; Na³ respectivement de CE moyenne 2,3 ; 6,5 et 9,6 dS/m)

Tige

La teneur en sodium des tiges de l'ensemble des variétés (Figure 14) varie suivant les niveaux de salinité des bacs. Elle est en moyenne de 26,5 µg/g PS dans le bac de 2,3 dS/m et passe à 52,1 µg/g PS sur le bac de 6,5 dS/m. Cette moyenne diminue dans le bac de 9,6 dS/m jusqu'à 39,8 µg/g PS. Chez les variétés D 14; IR 59418-7B-21-3; IR 61920-3B-22-2-1; IR 63275-B-1-1-1-3-2; IR 72046-B-R-1-1-2-1-B et WAS 201-B-2 la concentration du sodium au niveau de la tige a diminué dans l'environnement de 9,6 dS/m. Quant aux variétés IR 4630 ; FL 478 ; IR 76393-2B-7-1-13-1 et WAS 73-B-B-231-4, la concentration de sodium a augmenté.

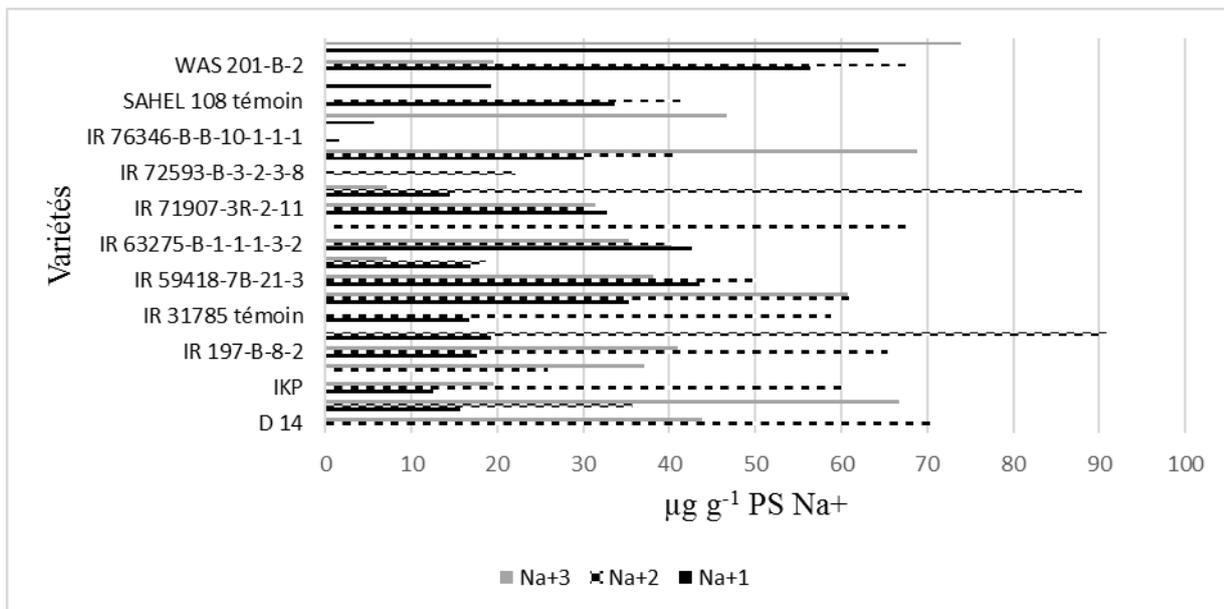


Figure 14 : Evolution de la teneur en sodium des tiges au niveau des différents bacs (Na+1 ; Na+2 ; Na+3 respectivement de CE moyenne 2,3 ; 6,5 et 9,6 dS/m)

Limbe des feuilles mortes

Au niveau du limbe des feuilles mortes la teneur en sodium augmente suivant le niveau croissant de la salinité (Figure 15). Elle évolue de 46,6 à 64,2 puis 81,9 µg/g PS respectivement dans les environnements de 2,3 ; 6,5 et 9,6 dS/m. Les variétés qui stockent le plus de sodium dans les limbes des feuilles mortes au niveau de l'environnement le plus salé sont : IR 76346-B-B-10-1-1 ; Nona Bokra ; FL 478 ; IR 59418 ; IR IR 63275-B-1-1-1-3-2 ; IR 1829-3R-89-1-1 ; IR 71907-3R-2-11 ; IR 4630 et IR 197-B-8-2.

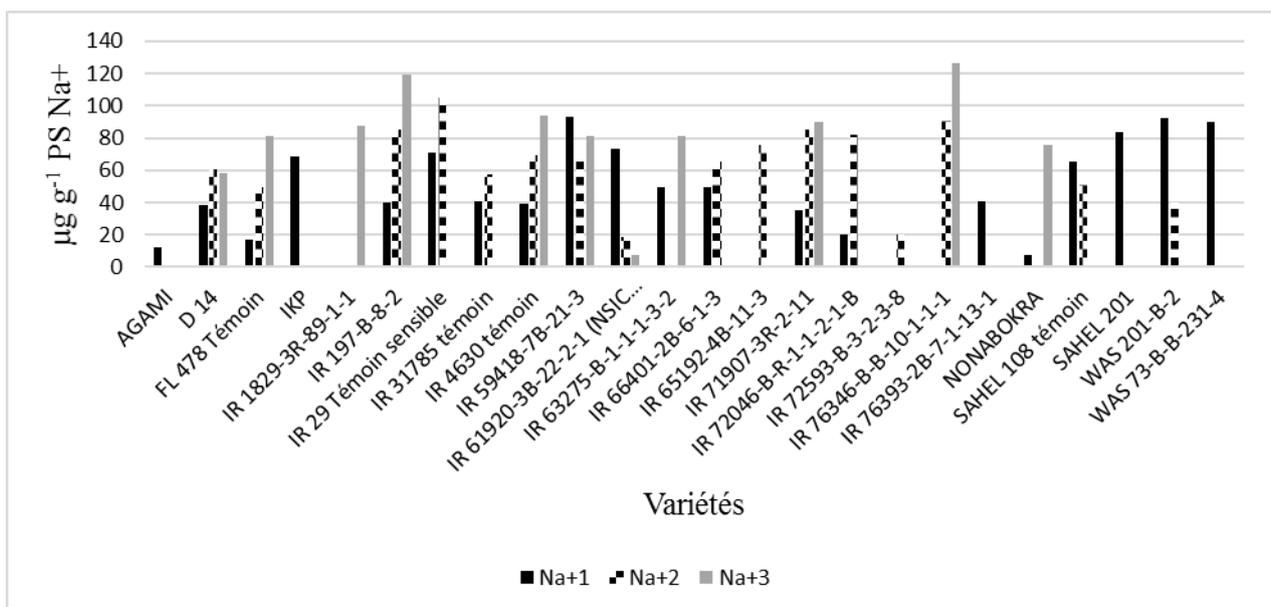


Figure 15 : Evolution de la teneur en sodium des limbes des feuilles mortes au niveau des différents bacs (Na+1 ; Na+2 ; Na+3 respectivement de CE moyenne 2,3 ; 6,5 et 9,6 dS/m).

Gaine des feuilles mortes

Au niveau des gaines des feuilles mortes, la teneur en sodium augmente aussi en fonction du niveau croissant de salinité, les variétés D14, Nona Bokra ; IR 59418-7B-21-3; IR 1829-3R-89-1-1 ; IR 71907-3R-2-11 et IR 76393-2B-7-1-13-1 ont les stocks de sodium dans la gaine des feuilles mortes les plus importants (Figure 16).

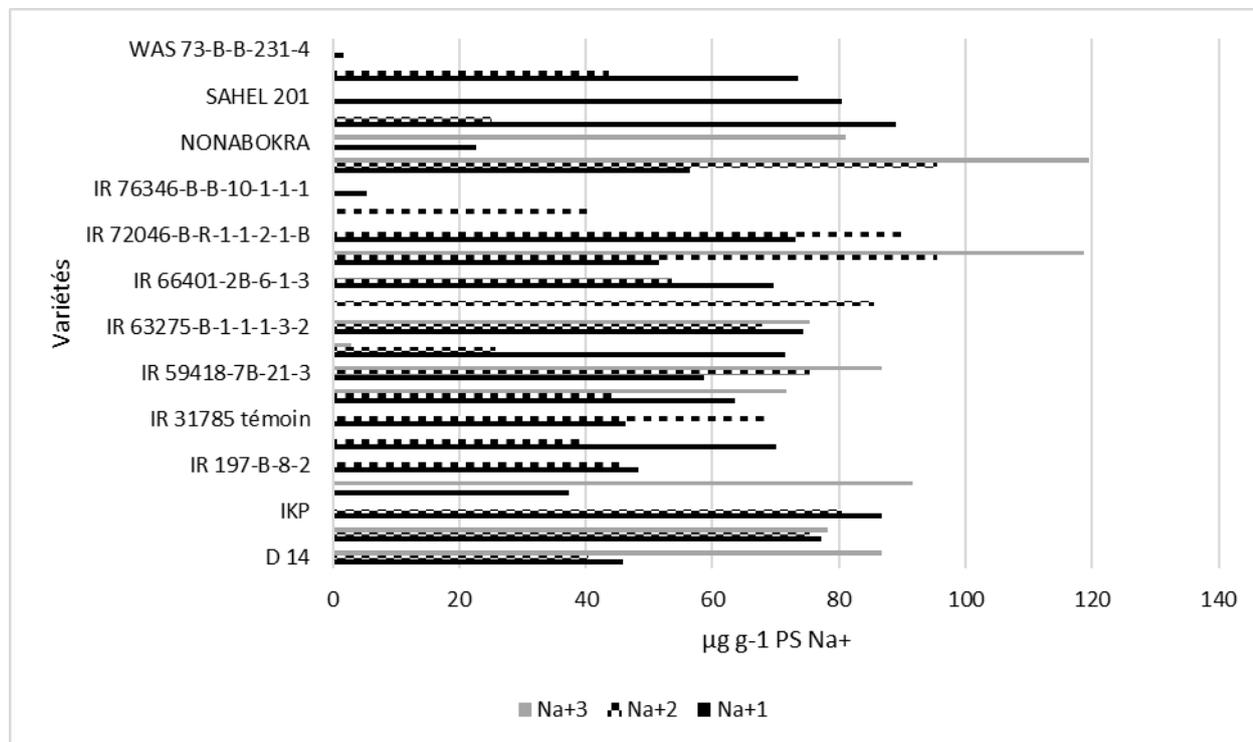


Figure 16 : Evolution de la teneur en sodium des gaines des feuilles mortes au niveau des différents bacs (Na+1 ; Na+2 ; Na+3 respectivement de CE moyenne 2,3 ; 6,5 et 9,6 dS/m)

Limbe des feuilles vertes

La teneur en sodium au niveau du limbe des feuilles vertes augmente dans l'ensemble des variétés en fonction du niveau croissant de la salinité des environnements. Les variétés qui ont plus de stock de sodium dans cette partie de la feuille sont : IR 197-B-8-2 ; WAS 73-B-B-231-4 ; WAS 201-B-2 ; IR 76346-B-B-10-1-1-1 ; D 14 ; IR 71907-3R-2-11 et IR 1829-3R-89-1-1 (Figure 17).

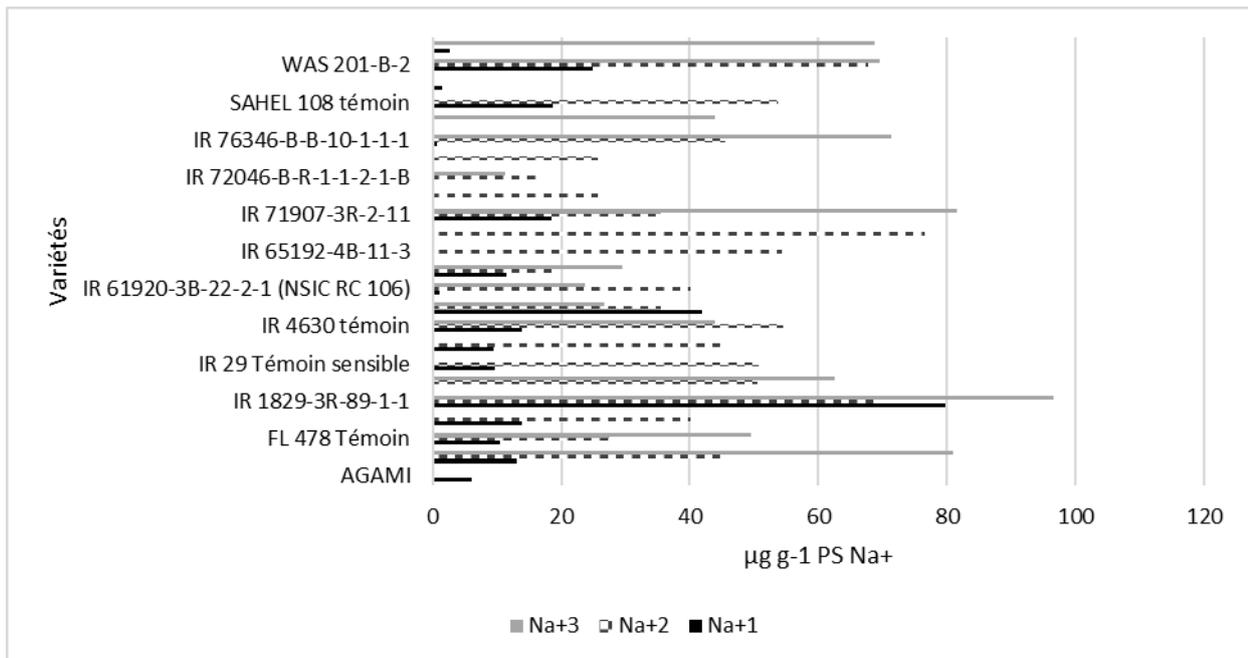


Figure 17 : Evolution de la teneur en sodium des limbes des feuilles vertes au niveau des différents bacs (Na+1 ; N+2 ; Na+3 respectivement de CE moyenne 2,3 ; 6,5 et 9,6 dS/m)

Gaines des feuilles vertes

L'évolution du sodium dans les gaines des feuilles vertes est aussi en fonction du niveau de salinité, les moyennes des concentrations de sodium évoluent de 24,5 à 55,3 µg/g de PS entre l'environnement de 2,3 à 9,6 dS/m. Les variétés qui se comportent comme le témoin tolérant FL 478 avec les plus fortes concentrations de sodium sont : Nona Bokra ; IR 71907-3R-2-11 ; WAS 73-B-B-231-4 ; IR 1829-3R-89-1-1 et IR 76393-2B-7-1-13-1 (Figure 18).

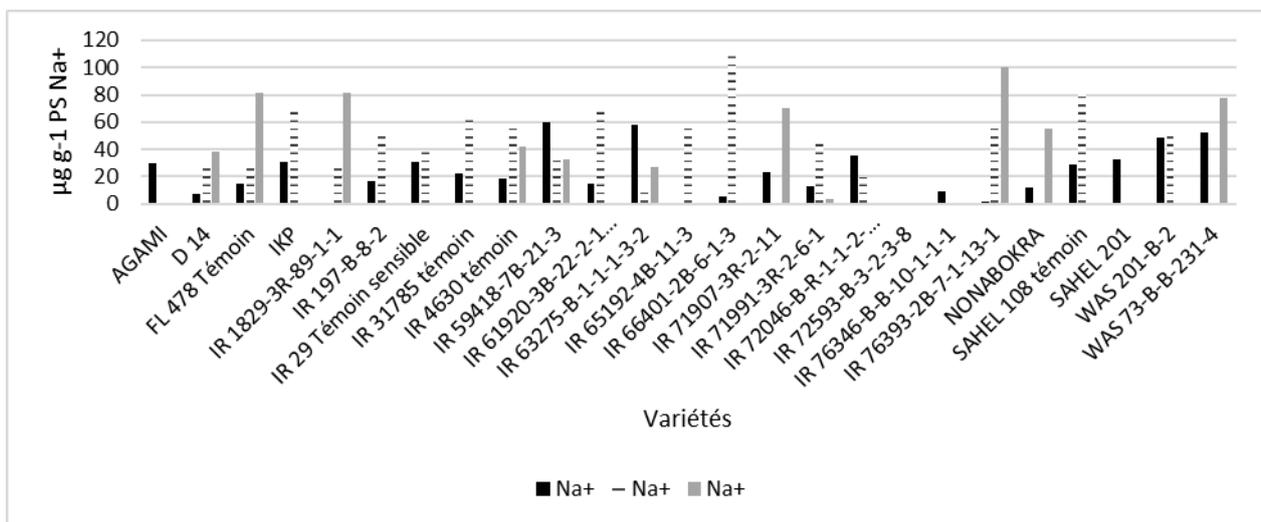


Figure 18 : Evolution de la teneur en sodium des gaines des feuilles vertes au niveau des différents bacs (Na+1 ; N+2 ; Na+3 respectivement de CE moyenne 2,3 ; 6,5 et 9,6 dS/m)

Répartition du sodium dans les différentes parties

La répartition du sodium dans les différentes parties de la plante étudiées montre que 46% de cet élément sont localisé dans les feuilles mortes (gaine et limbe) des variétés ayant survécu dans l'environnement le plus salé (9,6 dS/m) (Tableau 31).

Tableau 31 : Répartition des concentrations de sodium (en µg/g PS) au niveau des différents échantillons dans l'environnement de 9,6 dS/m

Variétés	Racine	TIGE	FVG	FVL	FMG	FML
D 14	52,4	43,86	38,14	32	86,71	58,14
FL 478 Témoin	18,1	66,71	47	49,57	78,14	81
IKP	7,08	19,58				
IR 1829-3R-89-1-1	56,14	37,15	81,45	96,64	91,58	87,78
IR 197-B-8-2	80,19	40,95		62,47		119,30
IR 4630 témoin	45,73	60,81	41,57	43,83	71,80	94,21
IR 59418-7B-21-3	32,43	38,14	32,43	26,71	86,71	81
IR 61920-3B-22-2-1		7,08		23,75	2,92	7,08
IR 63275-B-1-1-1-3-2	41	35,28	26,71	29,57	75,28	81
IR 71907-3R-2-11	29,70	31,46	70,06	81,45	118,80	89,74
IR 72046-B-R-1-1-2-1-B	7,08	7,08		11,25		
IR 76346-B-B-10-1-1-1				71,32		126,25
IR 76393-2B-7-1-13-1	71,33	68,80	100,44		119,43	
Nona Bokra	61	46,71	55,28	43,85	81	75,29
WAS 201-B-2	7,08	19,58		69,58		
WAS 73-B-B-231-4	62,47	73,86	77,66	68,80		
Pourcentage de sodium	11,61	11,32	16,23	14,43	23,10	23,29

Teneurs moyennes en potassium

La teneur en potassium des feuilles vertes (gaines et limbes), racine et tige diminue en fonction du niveau croissant de salinité (Figure 19). Les feuilles vertes ont des teneurs importantes en potassium.

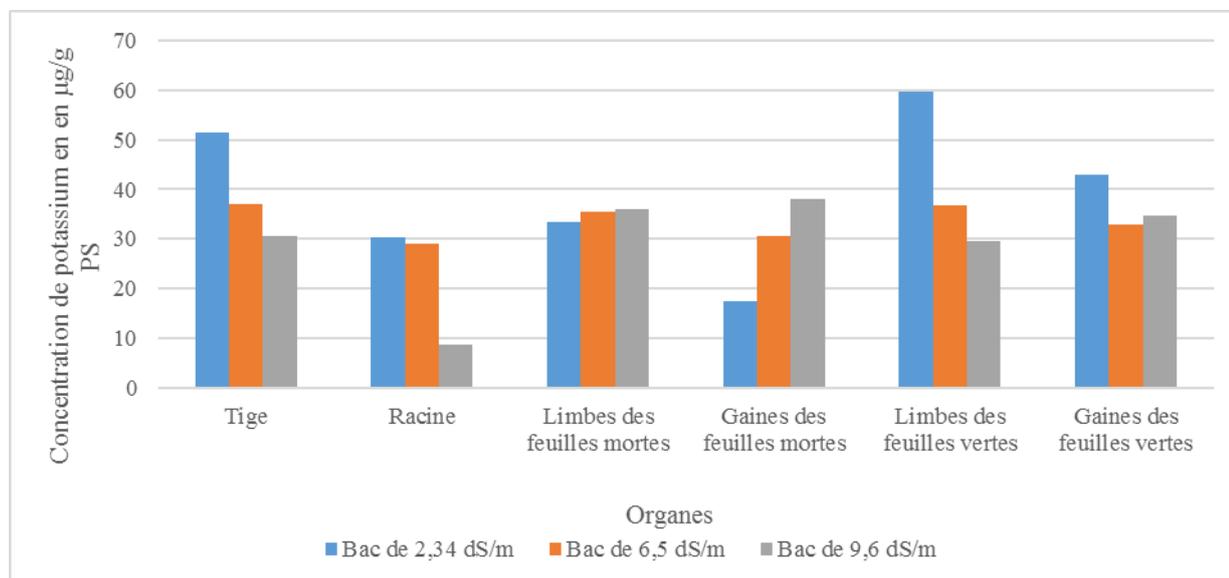


Figure 19: Moyenne des concentrations (en µg/g PS) de potassium des échantillons dans les différents bacs

IV. DISCUSSIONS

L'évolution de la teneur en sodium dans la plante de riz en phase végétative dépend des conditions de salinité, des différentes parties des organes de la plante et de la variété. Au niveau des racines la concentration de sodium croît en fonction du niveau élevé de la salinité pour toutes les variétés jusqu'à un certain niveau proche de 6,5 ds/m. Les variétés qui ont un comportement similaire à FL 478 (témoin tolérant) : IR 59418-7B-21-3; IR 63275-B-1-1-1-3-2; IR 71907-3R-2-11 et IR 72046-B-R-1-1-2-1-B, ont restreint l'entrée de sodium à 9,6 dS/m. Cette stratégie qui consiste à exclure le sodium du cytoplasme vers l'extérieur de la cellule débute avec la sélectivité de la membrane racinaire, ce qui peut résulter d'une réduction de la perméabilité passive, de la présence de transporteurs sélectifs et d'un transport vers le milieu extérieur des ions déjà absorbés (Zheng et al., 2003 ; Blumwald et al., 2004 ; Munns, 2005 ; Apse & Blumwald, 2007 ; Hanana, et al., 2009 ; IRRI, 2015). Cette régulation qualitative et quantitative du transport des ions permet de maintenir la concentration ionique dans une gamme de valeurs compatible avec un métabolisme cellulaire normal (Blumwald et al., 2004 ; Munns, 2005 ; Apse & Blumwald, 2007 ; Hanana et al., 2011).

La diminution des concentrations de sodium au niveau des tiges dans le bac de 9,6 dS/m des variétés IR 72046-B-R-1-1-2-1-B ; IR 59418-7B-21-3 et IR 63275-B-1-1-1-3-2 s'explique par la restriction des entrées des ions de sodium dans les racines.

Cependant pour la variété D14, entre les racines et la tige on enregistre une chute de la concentration de sodium. Cette diminution due à une perte de sodium au cours du transport s'explique par le mécanisme d'exclusion par le transport des ions déjà absorbés vers l'extérieur (Hanana et al., 2011).

Les variétés FL 478 ; IR 4630 ; WAS 73-B-B-231-4 et IR 59418-7B-21-3 ont des concentrations de sodium au niveau des tiges supérieures à celles des racines : les ions toxiques sont stockés dans la tige. Certaines plantes transfèrent les ions toxiques vers la tige (IRRI, 2015).

Au niveau du deuxième groupe des 7 variétés qui ont laissé l'entrée des ions de sodium, la forte concentration de sodium au niveau des feuilles (limbe et gaine) mortes démontre le transfert de cet ion toxique dans les feuilles âgées. Généralement la plante tente d'éviter une forte concentration de sodium au niveau surtout des jeunes feuilles en transférant le sodium dans les feuilles les plus âgées et la tige (Borsani et al., 2003 ; Zheng et al., 2003 ; Munns R. 2005 ; Apse & Blumwald, 2007 ; Hanana et al., 2011 ; IRRI, 2015). Ce phénomène est illustré par la concentration de sodium dans les feuilles mortes 46 % dans l'environnement de 9,6 dS/m.

Les concentrations en sodium des feuilles vertes (gaine et limbe) sont plus faibles que les autres concentrations (Feuilles mortes, tige et racine). Cependant, la variété WAS 73-B-B-231-4 qui survit avec des concentrations de sodium les plus importantes au niveau des feuilles vertes, semble tolérer le Na⁺.

Les variétés FL 478 et IR 59418-7B-21-3 ont montré deux mécanismes : restriction de l'entrée de sodium au niveau des racines et stockage du reste du sodium au niveau des limbes des feuilles âgées.

L'augmentation des concentrations de potassium au niveau des feuilles vertes démontre un autre mécanisme : ajustement ionique que la plante utilise pour baisser les concentrations des ions toxiques comme le Na⁺. En effet ce mécanisme non moins efficace développé permet de réduire et d'équilibrer la concentration d'ions dans le but d'ajuster la pression osmotique au niveau du cytoplasme (Shimose, 1963 ; Cuin & Shabala, 2008 ; Hanana et al., 2011). Ce dernier objectif peut être assuré par une augmentation des concentrations de potassium, outre celle des composés osmotiques compatibles (Munns & Tester, 2008). Le potassium joue un rôle aussi dans le contrôle de la turgescence cellulaire (Shimose, 1963).

V. CONCLUSION

La survie de la plante dans des conditions de salinité dépend du niveau de concentration du sel, de la variété et du stade de développement de la plante. Elle est fortement corollée à la gestion des ions Na^+ et K^+ au niveau de la plante. Les mécanismes développés par les variétés qui ont survécu à 9,6 dS/m sont :

- le transfert du sodium vers la tige et les feuilles âgées
- la restriction de l'entrée du sodium dans les racines

Dans ces deux cas la plante tente d'ajuster les ions toxiques en bloquant leur entrée ou bien en les stockant dans des parties moins sensibles (feuilles âgées). La variété WAS 73-B-B-231-4, en survivant avec des concentrations de Na^+ plus importantes, semble tolérer mieux les milieux salins.

CHAPITRE VI
DISCUSSION GENERALE

CHAPITRE VI : DISCUSSION GENERALE

Le développement de la culture du riz en Afrique de l'Ouest a été pendant très longtemps handicapé par certaines options politiques traduisant un décalage entre les principes d'une recherche d'autosuffisance et les comportements concrets des acteurs de la filière : l'Etat et les commerçants (Benz, 1992). Les possibilités de développement des rizicultures locales autochtones (diversité de conditions naturelles, des variétés, savoir-faire) sont restées mal connues. Les fortes potentialités de l'Afrique en riziculture (138 millions d'hectares de terres inondables) n'attiraient guère les bailleurs de fonds. Depuis les années soixante jusqu'à nos jours les efforts de développement ont porté en priorité sur la création de périmètres irrigués en dehors des régions de riziculture paysanne (Annie, 1995). Au Sénégal, ce n'est qu'en 2014 que les options du programme d'autosuffisance en riz furent révisées pour développer la riziculture paysanne (pluviale) avec un objectif de 40 % de la production attendue (MAER, 2014). Si les prévisions de récolte en paddy en 2015 donnent près de 900.000 tonnes, l'apport de la zone pluviale serait plus de 55%, ce qui démontre les potentialités rizicoles du pays non encore exploitées. En effet avec l'avènement de variétés améliorées en plateau et dans les bas-fonds, les systèmes culturaux devraient s'adapter avec des cultures associées (riz-arachide) dans le bassin arachidier, les cultures en couloir (riz et légumineuses arbustives) et les cultures intercalaires (riz-niébé).

La production rizicole dans la zone irriguée avec 60 % de l'objectif de production rencontre aussi des contraintes. Malgré l'absence de statistique sur le niveau d'abandon de terres rizicoles pour une raison de présence du sel et la répartition des différents types de salinité, le rythme de progression des terres salées semble être très inquiétant. En général dans l'écologie irriguée, 20% des terres ont des problèmes de salinité (Legros, 2009). Un mauvais système de drainage en irrigué crée une humidification en profondeur du sol et entraîne ainsi des remontées de sel en surface. Les autres causes qui accélèrent ce processus de salinisation sont : l'utilisation des fertilisants chimiques et des produits phytosanitaires ainsi que celle inappropriée des eaux saumâtres pour l'irrigation (IPTRID, 2006). Le faible niveau de développement et de diffusion de technologies rizicoles de lutte contre la salinité rend plus complexe la situation. La création de nouvelles variétés visant à combiner dans une variété les caractères identifiés dans les collections de travail fait partie des thématiques de recherches les plus utilisées à nos jours pour apporter des solutions à cette contrainte. Le système de partenariat, dans le cadre du projet STRASA, a facilité l'introduction de beaucoup de variétés supposées tolérantes à la salinité.

Le travail du sélectionneur dépend toujours de l'espèce végétale à améliorer, de sa biologie et de son mode de reproduction. La sélection variétale exige une bonne connaissance des méthodes

adéquates pour l'identification des plantes supérieures, une bonne compréhension des ressources génétiques satisfaisantes pour les caractères désirés et des conditions écologiques, des enjeux, des perspectives et une mesure de l'importance des progrès à faire dans la création variétale. Le sélectionneur doit avoir pour mission de mettre à la disposition des producteurs de nouvelles variétés plus productives, mieux adaptées à l'environnement (milieu physique, biologique, économique et humain) et de meilleure qualité que celle qui sont actuellement disponibles (Sié et *al.*, 2009). Les objectifs d'un programme de sélection doivent être clairs et précis en tenant compte des enjeux biologique et économique.

L'approche de sélection participative utilisée a permis d'intégrer dès le début du processus les attentes des producteurs. Pendant longtemps les programmes de sélection ont été jugés suivant le nombre de variétés homologuées. Cependant, pour être efficient, le jugement doit porter sur le nombre de variétés adoptées par les producteurs et les consommateurs. L'amélioration de cette adoption des variétés nécessite une approche participative avec un groupe de chercheurs pluridisciplinaires, les producteurs et les consommateurs. La sélection variétale participative, telle que vulgarisée par certains instituts, renferme une particularité. En effet les producteurs, après avoir choisi les variétés qu'ils jugent s'adapter dans leur environnement, reçoivent en deuxième année leurs semences des essais paysans (FAT : Farmers Advanced Trial) qui sont différents des essais multi-locaux (PAT : Participatory Advanced Trial). En fait le FAT n'est pas un essai variétal géré par le sélectionneur mais une activité de production en plein champ gérée entièrement par le producteur avec sa propre conduite culturale. L'objectif visé dans cette activité (FAT) est de voir l'année suivante les semences des variétés qui seront reproduites par le producteur pour juger l'adoption de la variété. Cette pratique est diversement appréciée par les chercheurs. En fait, les variétés à ce stade du processus ne sont pas encore homologuées et risquent de se propager très vite sans aucun contrôle de la pureté variétale. En plus la réglementation semencière harmonisée au niveau de la CEDEAO et de l'UEMOA, en ses articles 21 et 70 interdisent toute multiplication et commercialisation de semences des variétés qui ne sont pas inscrites dans le catalogue officiel. Actuellement une dynamique de protection des obtentions végétales semble être enclenchée avec cette harmonisation notamment les normes de caractérisation DHS/VATE. La sélection variétale participative doit ainsi être révisée. Au Sénégal, l'approche de sélection variétale participative utilisée sur le riz dans la zone irriguée tente de s'adapter dans ce contexte.

- La première année, l'essai PET (Participatory Evaluation Trial) est conduit deux fois (en contre saison et en hivernage). Les choix des producteurs lors des deux visites sont analysés et combinés avec les analyses statistiques pour sélectionner une dizaine de variétés qui seront utilisées en années deux et trois en essais DHS/VATE.

- L'essai DHS est conduit en station pendant deux contre saison et deux hivernage et comporte en plus des 10 variétés, 2 références (variétés locales homologuées). Les caractères obligatoires de l'UPOV sont suivis pour chaque campagne (Tableau 3).
- L'essai VATE est conduit dans 4 sites en milieu paysan avec les mêmes variétés en deux contre saisons et deux hivernages. Le dispositif utilisé en blocs aléatoires complets et les paramètres de rendement sont suivis dans chaque essai. A chaque récolte, un échantillon de 150 kg par variété est prélevé pour les analyses de qualité grain notamment les tests organoleptiques. Des tests de dégustation sont aussi organisés chaque pour avoir des informations sur l'appréciation des consommateurs.
- Production de semences du sélectionneur : Dès le choix des variétés en première année, les panicules des variétés sélectionnées sont utilisées en deuxième année pour une sélection conservatrice permettant de reproduire les panicules G0 et de la G1. Durant les deux années de tests DHS/VATE les niveaux de semences du sélectionneur (G0 à G2) sont assez produits ce qui facilitera la production du niveau pré-base (G3 certifié) des variétés qui seront homologuées.

L'inscription d'une variété au catalogue d'une variété n'est pas du ressort du sélectionneur. Le Comité National Consultatif Semence et Plants (CNCSP) est le seul organe chargé de l'inscription des nouvelles variétés avec l'appui d'un arrêté ministériel (CEDEAO, 2008). Ce comité doit avoir en son sein une cellule chargée d'effectuer les tests DHS/VATE pour vérifier et valider toutes les propositions.

L'introduction de 36 variétés améliorées dans les centres internationaux de recherche (IRRI, AfricaRice, CIRAD...) à travers différents instituts nationaux de recherche témoigne la dynamique du Groupe d'actions des sélectionneurs riz d'Afrique. En fait les réseaux de partenariat de recherche au niveau continental et international facilitent les partages et les échanges de matériel végétal et de nouvelles technologies.

Le dispositif statistique utilisé s'explique par la faiblesse des quantités des semences qui ne permet pas de couvrir l'ensemble des sites des pays avec des répétitions. Le dispositif « Augmented Design » est une randomisation totale des variétés à tester dans différents blocs. Chaque bloc contient par la suite des témoins. Si tous les témoins sont répétés aléatoirement dans chaque bloc comme c'est le cas dans cette expérience, on parle de « Augmented design » dispositif augmenté en blocs aléatoires complets (Federer & Raghavarao, 1975).

L'évolution de la salinité au champ au niveau de la station de AfricaRice Saint Louis montre un sol salin d'après la classification de FIREMAN & BLAIR en 1949. Les différentes réactions des

variétés élucidées : diminution de la croissance, du nombre de talles, de la biomasse et du rendement sont confirmées par les travaux de différents chercheurs (Amirjani, 2010 ; Munns & Termaat, 1986 ; Asch et *al.*, 2000).

L'évolution de l'incidence de la salinité sur le nombre de plants repris et le nombre de feuilles de riz démontre sa sensibilité à la salinité durant le stade plantule (Laffitte et *al.*, 2004).

Les mécanismes physiologiques développés suivant les concentrations de Na⁺ et K⁺ dans les différentes parties de la plante montre que la plus part des variétés stock les ions de sodium des les feuilles âgées (Hanana et *al.* en 2011). En fait ce transfert du sel dans ces feuilles résulterait la compartimentation vacuolaire des ions Na⁺ et Cl⁻ absorbés ou exclus hors de la cellule.

Le problème de la salinité reste très complexe et multiple : l'eau d'irrigation chargée d'ions toxiques perturbe aussi la nutrition minérale de la plante à cause des interactions entre ions ; la plante a ainsi mal à absorber l'eau du sol du fait de sa pression osmotique élevée ce qui crée souvent un stress hydrique en plus du stress salin (Lin et *al.*, 2004). Ce stress hydrique est une conséquence du stress salin.

CHAPITRE VII
CONCLUSION GENERALE ET
PERSPECTIVES

CHAPITRE VII : CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Dans un contexte actuel marqué par les changements climatiques et la course vers l'autosuffisance en riz surtout en Afrique Sub saharienne, un des défis de la sélection variétale est de mettre à la disposition des producteurs et consommateurs des variétés de riz qui s'adaptent aux effets néfastes des perturbations climatiques, productives et d'une bonne qualité de grain. Pour développer de nouvelles variétés de riz tolérantes à la salinité et productives dans les systèmes agro-écologiques du riz au Sénégal, la recherche d'une base de variétés élites a été faite dans le cadre du projet STRASA à travers différents essais de criblage. La sélection variétale participative a permis de sélectionner 16 variétés en combinant les choix des producteurs et les analyses statistiques sur quelques paramètres agronomiques. Aussi, 8 autres variétés ont été ajoutées du fait de leur performance pour étudier les effets du sel sur 24 variétés de riz en milieu réel. La classification de K-means suivant les incidences du sel sur les paramètres agronomiques a permis de classer les variétés. L'incidence du sel est plus sévère sur le rendement à cause du fort taux de stérilité qu'il induit durant la phase de reproduction.

En phase végétative, l'effet du sel est plus manifeste sur les feuilles et le nombre de plants ayant repris.

Les comportements des variétés de riz dans différents niveaux de salinité manifestés sur les paramètres agronomiques traduisent différents mécanismes physiologiques de tolérance à la salinité. Les variétés D14, IKP, IR-1829-3R 89-1-1, IR 72593-B-3-2-3-8 et WAS 201-B-2 ont pu limiter les dégâts du sel à 6,33 dS/m ; elles sont des potentiels parents élites dans des schémas de croisement avec les meilleures variétés locales. Quant aux variétés D14, IR 59418-7B-21-3, IR 61920-3B-22-2-1 et WAS 73-B-B-231-4, elles ont confirmé leur performance avec des rendements supérieurs à 4 T/ha dans des conditions de salinité de 4,86 dS/m. Elles ont été choisies par les producteurs en première année de sélection variétale participative, et peuvent être proposées à l'homologation pour une production dans les zones de salinité moyenne dans la vallée du fleuve Sénégal.

La sélection variétale participative, le criblage des variétés au champ, ainsi que les études agro morphologiques et physiologiques ont permis d'avoir une liste de variétés élites tolérantes à la salinité et qui sont : D14 ; WAS 73-B-B-231-4 ; IR 59418-7B-21-3 ; 72593-B-3-2-3-8 et IR 71991-3R-2-6-1.

En Gambie et au Mali, des variétés tolérantes à la salinité ont été homologuées sous le label ARICA (Advanced Rice for Africa). L'intégration des critères de choix des producteurs dans le processus

de sélection a permis d'améliorer l'adoption des variétés. En effet, les producteurs connaissent mieux les performances des variétés.

En guise de perspectives, différentes études pourraient être réalisées pour mieux maîtriser les différents comportements des variétés dans le but d'améliorer les stratégies de culture du riz en milieu salé. Ces études sont :

- Caractérisation DHS/VATE des variétés D14 ; WAS 73-B-B-231-4 ; IR 59418-7B-21-3 ; 72593-B-3-2-3-8 et IR 71991-3R-2-6-1 pour leur proposition à l'homologation
- Détermination des réactions agro morphologiques et physiologiques des variétés en phase de reproduction pour comparer les différentes réactions des variétés suivant les stades de développement et les niveaux de salinité
- Détermination des mécanismes physiologiques avec un suivi régulier des ions Na⁺ et K⁺ du sol ou de la lame d'eau aux différentes parties de la plante et suivant leur stade de développement et dans différents niveaux de salinité pour situer le stockage du sel au sein de la plante en fonction du niveau de salinité
- Amélioration variétale par le développement de nouvelles lignées par croisement simple et retro-croisement de ces variétés élites avec les meilleures variétés locales homologuées telles que Sahel 108, Sahel 201 et NERICA S 19 pour améliorer les rendements en milieu salé.
- Identification de QTL de tolérance à la salinité par le développement de nouvelles variétés tolérantes à la salinité accompagné par une identification des régions chromosomiques associées à ce critère en utilisant la cartographie de QTL. Le QTL ou locus de caractères quantitatifs est une région plus ou moins grande de l'ADN, étroitement associée à un caractère quantitatif, où est localisé un ou plusieurs gènes qui sont à l'origine du caractère en question. L'identification de QTL donne ainsi plus d'assurance sur le développement de nouvelles populations. La cartographie de QTL pourrait se faire sur quatre populations en F2 issues des croisements de: NERICA-S-44/D 14 ; SAHEL 159/IR 59418-7B-21-3 ; SAHEL 159/WAS 73-B-B-231-4 et SAHEL 317/IR 72593-B-3-2-3-8. Le phénotypage se réalisera dans ce cas en F3.
- Gestion intégrée de la salinité des sols par combinaison de différentes techniques de fertilisation organo-minérale et de gestion de la lame d'eau pour améliorer les rendements des différentes variétés.

La stratégie durable de gestion de la salinité des sols s'appuiera sur une approche intégrée combinant les nouvelles variétés tolérantes et des technologies agronomiques. En effet une variété une fois développée doit être « habillée » de pratiques culturales pour une meilleure expression de ses potentialités.

BIBLIOGRAPHIE

Bibliographie

1. AFD, 2011. Crise rizicole, évolution des marchés et sécurité alimentaire en Afrique Ouest. Rapport.
2. AfricaRice, 2009. Rapport annuel STRASA. Cotonou Bénin
3. Ahmadi N., Negrão S., Katsantonis D. J. F., Ploux J., Letourmy P., Courtois B., 2011. Targeted association analysis identified japonica rice varieties achieving Na(+)/K (+) homeostasis without the allelic make-up of the salt tolerant indica variety Nona Bokra. *Theor Appl Genet.* 2011 Oct;123(6) :881-95. doi: 10.1007/s00122-011-1634-4. Epub 2011 Jun 29
4. Amirjani M. R., 2010. Effect of NaCl on Some Physiological Parameters of Rice. *EJBS* 3
5. Ammar M., 2004. Molecular mapping of salt tolerance in rice. New Delhi, India.: Ph. D. Thesis, Indian Agricultural Research Institute.
6. Amtmann A. & Leigh R., 2010. Abiotic stress adaptation in plants: Physiological, molecular and genomic foundation. In A. Pareek, S. Sopory, H. Bohnert, & Govindjee, *Ion homeostasis* pp. 245–262.
7. Annie C.L., 1995. Comment se pose le problème de l'avenir des riziculteurs africains? Dans Annie C.L. & Alain L., *Les rizicultures de l'Afrique de l'Ouest*. Bordeaux: Colloque international.,
8. Apse M. & Blumwald E., 2007. Na⁺ transport in plants. *FEBS Lett.* 581.
9. Asch F., Dingkuhn M. & Dorffling K., 2000. Salinity increases CO₂ assimilation but reduces growth in field-grown, irrigated rice. *Plant Soil.* 218:1-10. Ashraf, M. and A. Khanum, 1997
10. Asch F., Dingkuhn M., Dörffling K. & Miezian K., 2000. Leaf K/Na ratio predicts salinity induced yield loss in irrigated rice. *Euphytica.*
11. Assemien N. K., 1984. Réponse physiologique du riz (*Oryza sativa* L.) au déficit hydrique. Étude comparée de types culturaux (variété pluviale, variété aquatique). Thèse de doctorat ingénieur à École Nationale Supérieure Agronomique.
12. Becker M., Johnson D., Wopereis M. C. & Sow A., 2003. Rice yield gaps in irrigated systems along an agro-ecological gradient in West Africa. *Plant Nutrition and Soil Science* 166, 61-67.
13. Ben-Hayyim G. & Kochba J., 1983. Aspects of salt tolerance in a NaCl-selected stable cell line of citrus sinensis. *Plant Physiol:* 72.
14. Benz H., 1992. Quel rôle des compagnies de négoce international dans le marché de riz ? Atelier sur les "Echanges commerciaux et systèmes vivriers de production dans es PVD Processus et Pratiques

15. Benzel M., Hasegawa M., Rhodes D., Handa S., Handa A. & Bressan R., 1987. Solute accumulation in tobacco cells adapted to NaCl. *Plant Physiol* 84.
16. Binzel M., Hess F., Bressan R. & Hasegawa M., 1988. Intracellular compartmentation of ions in salt adapted tobacco cells. *Plant physiol.* 86.
17. Blumwald E., Grover A. et Good A.G., 2004. Breeding for abiotic stress resistance: challenges and opportunities. 2004 « New directions for a diverse planet ». Dans *Proceedings of the 4th International Crop Science Congress*, 26 September – 1 October 2004, Brisbane, Australia. [CDROM]. Web site [www.cropscience.org.au](http://www.cropsscience.org.au).
18. BMS 3.0.8, 2015. Manage list. Logiciel téléchargé dans www.integratedbreedingsystem.net
19. Bohra J. & Dörffling K., 1993. Potassium nutrition of rice (*Oryza sativa* L.) varieties under NaCl salinity. *Plant soil*.
20. Borsani O., Valpuesta V. & Botella M., 2003. Developing salt tolerant plants in a new century : a molecular biology approach. *Plant Cell Tissue Organ Cult.*
21. Bot A.J., Nachtergaele F.O. & Young A, 2000. Land resource potential and constraints at regional and country levels. *World soil resources reports vol 90*. FAO , 113.
22. Bouharmont J., 1991. Utilisation de la variation somaclonale et de la sélection in vitro à l'amélioration du riz. In *L'amélioration des plantes pour l'adaptation aux milieux arides* pp. 1-8.. Paris: AUPELF-UREF. John Libbey Eurotext.
23. Boyer J., 1982. Plant productivity and environment. *Science*, 2018, 443 - 448.
24. CEDEAO, 2008. Règlement C/REG.4/05/2008 portant harmonisation des règles régissant le contrôle de qualité, la certification et la commercialisation des semences végétales et plants dans l'espace CEDEAO. Communiqué du soixantième session du conseil des ministres des 17 et 18 mai 2008 à Abuja.
25. Chang T. T., 1983. The origins and early cultures of the cereal grains and food legumes. In D.N. Keightley, ed. *The origins of Chinese civilization*.
26. Chinnusamy V., Jagendorf A., Zhu J. K., 2005. Understanding and improving salt tolerance in Plants. *Crop Science*, v.45, no.2, 2005 March-April, p.437(12) (ISSN: 0011-183X)
27. Clarkson D. T. & Hanson J. B., 1980. The Material nutrition of higher plants. *Annu. Rev. Plant Physiol.* 31, 239.
28. Cuin T.A. and Shabala S., 2008. Compatible solutes mitigate damaging effects of salt stress by reducing the impact of stressinduced reactive oxygen species. *Plant Signal., Behav.* 3(3) : 207– 208. doi:10.4161/psb.3.3.4966. PMID:19704661.
29. Devitt D., Jarreli W. & Stevens K., 1981. Sodium-potassium ratios in soil solution and plant response under saline conditions. *Soil Sci. SOC. Am. J.* 45, 80-86 .

30. Diagne A., Alia D. Y., Eyram A. A., Wopereis M. C., Saito K., & Nakelse T., 2013. Farmer Perceptions of the Biophysical Constraints to Rice Production in Sub-Saharan Africa, and Potential Impact of Research. In Wopereis M.C., D. E. Johnson N., Ahmadi E. Tollens, & Jalloh A., Realizing Africa's Rice Promise pp. 46-68. CABI, AfricaRice.
31. Diagne A., Eyram A.A., Futakuchi K. & Wopereis M. C., 2013. Estimation of Cultivated Area, Number of Farming Households and Yield for Major Rice-growing Environments in Africa. In Wopereis M.C., D. E. Johnson N., Ahmadi E. Tollens, & Jalloh A., Realizing Africa's Rice Promise pp. 46-68. CABI, AfricaRice.
32. DIAW Ndèye Thioro, 2000. Evaluation au champ et en conditions de salinité des performances agromorphologiques et physiologiques de lignées de riz *Oryza sativa* L. cultivar 1 Kong Pao (IKP) sélectionnées in vitro en présence de sel., thèse soutenu le 31 Juillet 2000, à UCAD
33. Epstein E., Norlyn J., Rush D., Kingsbury R., Kelley D., Cunningham G. & Wrona A., 1980. Saline culture of crops : A genetic approach. *Science* 210, 399–404.
34. Evans L. & Fischer R., 1999. Yield Potential: Its Definition, Measurement, and Significance. *Crop Science*, 39, 1544-1551.
35. FAO MAFA SPAAA, 2013. Analyse des incitations et pénalisation pour le riz au Mali. <http://www.fao.org/mafap/accueil-du-spaaa/fr/>
36. FAO n.d.. FAO SOIL PORTAIL. Accédé le 06/08/2015, from <http://www.fao.org/>: <http://www.fao.org/soils-portal/soil-management/management-of-some-problem-soils/salt-affected-soils/more-information-on-salt-affected-soils/en/>
37. FAO SOIL PORTAIL, accédé le 06/0/2015. <http://www.fao.org/>: <http://www.fao.org/soils-portal/soil-management/management-of-some-problem-soils/salt-affected-soils/more-information-on-salt-affected-soils/en/>
38. FAO, 1997. Systèmes améliorés de riziculture. Rapport FAO
39. FAO, 2003. Guide d'identification des contraintes de terrain à la production du riz. Rapport FAO
40. FAO, 2004. ANNEE INTERNATIONALE DU RIZ. Rapport FAO
41. FAO, 2005. AQUASAT. Retrieved from <http://www.fao.org/nr/water/aquastat/data/query/>: www.fao.org
42. FAO, 2010. FAOSTAT. Retrieved juin 28, 2015, from <http://faostat3.fao.org/compare/F>
43. FAO, 2012. Aperçu du développement rizicole Sénégal., Rapport FAO
44. FAO, 2015- Avril. Suivi du Marché Riz (SMR). Rapport FAO
45. FAO, accédé 25/12/2015. <http://www.fao.org/ag/agl/agll/spush/> .

46. FAO. (n.d.). FAO SOIL PORTAIL. Retrieved 6 8, 2015, from <http://www.fao.org/http://www.fao.org/soils-portal/soil-management/management-of-some-problem-soils/salt-affected-soils/more-information-on-salt-affected-soils/en/>
47. Federer W. T. & Raghavarao D., 1975. ON AUGMENTED DESIGNS. *BIOMETRICS*, 31, 29-35.
48. Fireman M. & Blair G.Y., 1949. Chemical and physical analyses of soils from the humboldt project, nevada. Retrieved from Fireman M., and Blair G. Y. Chemical and physical analyses of soils from the humboldt project, nevada. 1 Unpublished.1 January 1949.
49. Fischer G., van Velthuisen H., Shah M. & Nachtergaele F., 2002. Global agro-ecological assessment for agriculture in the 21st century: methodology and results. International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg.
50. Flowers J. T. & Yeo A. R., 1981. Variability in the resistance of sodium chloride salinity within rice (*Oryza sativa* L.) varieties. *New Phytol* 88, pp. 363-373.
51. Flowers T., Koyama M., Flowers S., Sudhakar C., Singh K. & Yeo A., 2000. QTL: their place in engineering tolerance of rice to salinity. *The Journal of Experimental Botany*, Col. 51, No. 342.
52. Flowers T., Troke P. & Yeo A., 1977. The mechanisms of salt tolerance in halophytes. *Annu. Rev. Plant Physiol*
53. Fred Rattunde et Wolfgang Schipprack, 2014. Cours Héritabilité – estimation. CERAAS.
54. Ghassemi F., Jakeman A. & Nix H., 1995. *Salinization of Land and Water Resources*. Canberra, Australia.: Univ. of New South Wales Press, Ltd., .
55. GNIS 2015. Récupéré sur www.gnis.org: <http://www.gnis-pedagogie.org/biotechnologie-amelioration-histoire-selection.html>
56. Grattan S. R., Zeng L., Shannon M. C. & Roberts S. R., 2002. Rice is more sensitive to salinity than previously thought. *California agriculture*.
57. Gregorio G. B., Senadhira D. & Mendoza R. D., 1997. Screening for salinity tolerance. *IRRI DISCUSSION PAPER SERIES NO. 22*
58. Gregorio G., 1997. Ph.D. dissertation. 118: College, Laguna, Philippines: University of the Philippines Los Ba os, Laguna
59. Gregorio G., Senadhira D., Mendoza R., Manigbas N., Roxas J., & Guerta C. 2002. Progress in breeding for salinity tolerance and other abiotic associated stresses in rice. *Field Crops Res.* . Retrieved from www.irri.org: http://www.knowledgebank.irri.org/ricebreedingcourse/Breeding_for_salt_tolerance.htm
60. Hanana M., Cagnac O., Zarrouk M. and Blumwald E., 2009. Rôles biologiques des antiports vacuolaires NHX : acquis et perspectives d'amélioration génétique des plantes. *Botany*, 87(11) : 1023–1035. doi:10.1139/B09-073

61. Hanana M., Hamrouni L., Cagnac O. & Blumwald E., 2011. Mécanismes et stratégies cellulaires de tolérance à la salinité (NaCl) chez les plantes. Presse scientifique du CNRC.
62. Hasegawa P.M., Bressan R.A., Zhu J.K., Bohnert H.J, 2000. Plant cellular and molecular responses to high salinity. *Annu. Rev. Plant Physiol.*
63. Hayward H. E. & Wadleigh C. H., 1949. Plant growth on saline and alkali soils. *Advances in Agronomy.*
64. Heenan D. L.G. L. & McCaffery D., 1988. Salinity tolerance in rice varieties at different growth stages. *Exp. Agric.*
65. Hoa L. Q., 2004. Analyse de la tolérance du riz à la salinité par l'approche SSH-microarrays. Rennes: ENSAR, 190 p. Thèse de doctorat : Biologie et agronomie : Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Rennes.
66. INP, 2008. Rapport annuel. Institut National de Pédologie Dakar, Sénégal.,
67. IPTRID, 2006. Conférence électronique sur la salinisation: Extension de la salinisation et Stratégies de prévention et réhabilitation. https://www.agrireseau.net/agroenvironnement/documents/Salinisation_irrigation.pdf
68. IRRI, 1996. Standard Evaluation System for Rice. IRRI
69. IRRI, 2015 Récupéré sur http://www.knowledgebank.irri.org/ricebreedingcourse/Breeding_for_salt_tolerance.htm. (accédé ce 25/12/2015)
70. Ismail A., Heuer S., Thomson M. & Wissuwa M., 2007. Genetic and genomic approaches to develop rice germplasm for problem soils. *Plant Mol Biol.*
71. Kaddah M., 1963. Salinity effects on growth of rice at the seedling and inflorescence stages of development. *Soil Sci.* 96: 105–111.
72. KAFACI, accédé 30/07/2015. <http://www.kafaci.org/projects/project.asp>
73. Khan M. S., Hamid A. & Karim M., 1997. Effect of sodium chloride on germination and seedling characters of different types of rice (*Oryza sativa* L.). *J. agronomy Crop Sci.* 179, 163 - 169.
74. Khatum S., Rizzo C. & Flowers T., 1995. Genotypic variation in the effect of salinity on fertility in rice. *Plant soil*, 173, 239 - 250.
75. Koyama M., Levesley A., Koebner R., Flowers T. & Yeo A., 2001. Quantitative trait loci for component physiological traits determining salt tolerance in rice. *Plant Physiology.* 125, 406-422
76. Laffitte H. R., Yongsheng G., Yan S., & LI Z. K., 2004. Whole plant responses, key processes, and adaptation to drought stress: the case of rice. *Journal of Experiment Botany.*

77. Le Quang H., 2004. Analyse de la tolérance du riz à la salinité par l'approche SSH-microarrays. Rennes : ENSAR, XV-175 p: Thèse de doctorat : Biologie et agronomie.
78. Lee S., Ahn J., Ch, Y., Yun D., Lee M., Ko J., . . . Eun M., 2006. Mapping of Quantitative Trait Loci for salt tolerance at the seedling stage in rice. *Mol. Cells*, 21 2: , 192-196.
79. Legros J.P., 2009. Salinisation des terres dans le monde. *Bulletin n°40*, 257-269.
80. Lenntech, 2015. Risque de salinité. Récupéré sur <http://www.lenntech.fr/francais/irrigation/salinite-risque-irrigation.htm>: (Accédé le 10/09/2015)
81. Lin H., Zhu M., Yano M., Gao J., Liang Z., Su W., . . . Chao D., 2004. QTLs for Na⁺ and K⁺ uptake of the shoots and roots controlling rice salt tolerance. *Theor. Appl. Genet.* 108: , 253-260.
82. Lutts S., Kinet J. M. & Bouharmont J., 1995. Changes in plant response in NaCl during development of rice (*Oryza sativa* L.) varieties differing in salinity resistance. *Journal of Experimental Botanique* 46, pp. 1843-1852.
83. Iwaki S., Ota K. & Ogo T., 1953. IV. The effects on the growth, heading and ripening of rice plants under varying concentrations of sodium chloride. Dans *Studies on the salt injury in rice plant*.
84. Maas E. & Hoffman G., 1997. Crop salt tolerance - Current assessment. *J. Irrig. Drain. Div. ASCE* 103, 115 - 134.
85. Maas E. V., 1990. Agricultural salinity assessment and management. *ASCE Manuals and reports on Engineering*, 262-304.
86. Maas E. V., 1993. *Testing Crops for Salinity Tolerance*. Pub. No. 94-2, Univ of Ne, Lincoln, NE.
87. MAER, 2014. Programme National Autosuffisance en Riz. Rapport, Ministère de l'Agriculture et de l'Équipement Rural du Sénégal
88. Manneh B., 2004. Genetic, physiological and modelling approaches towards tolerance to salinity and low nitrogen supply in rice (*Oryza sativa* L.). Thesis
89. Marius C., 1985. *Mangroves du Sénégal et de la Gambie - Ecologie Pedologie Géochimique Mise en valeur et aménagement*. ORSTOM.
90. Mérieau C., 2001. Etude des conditions d'intensification des productions bovines de la zone de Niono, "Office du Niger", Mali. Mémoire d'ingénieur.
91. Miezán K., M. C. S. Wopereis and C. Donovan, 1999. Technology transfer through partnerships: WARDAS's experience with irrigated rice in the Sahel. *Entwicklung und laendlicher raum* (99/4): 30-32.
92. Munns R and Tester M ., 2008. Mechanisms of salinity tolerance. *Annu Rev Plant Biol.*
93. Munns R. & Termaat A., 1986. Whole-plant responses to salinity. *Aus. J. plant*

94. Munns R. and Tester M., 2008. Mechanisms of salinity tolerance. *Annu Rev Plant Biol.*
95. Munns R., & Termaat A., 1986. Whole-plant responses to salinity. *Aus. J. plant.*
96. Munns R., 2002. Comparative physiology of salt and water stress. *Plant cell Environ* 25(2), 239 - 250.
97. Munns R., 2005. Genes and Salt tolerance : bringing them together. *New Phytol.*
98. Nahon D., 2008. L'épuisement de la Terre : L'enjeu du XXIe siècle. Odile Jacob.
99. Narale R., Subramangam T. & Mukherjee R., 1969. Influence of salinity on germination, vegetative growth, and grain yield of rice (*Oryza sativa* var. Dular). *Argon.*
100. Natarajan S., Ganapathy M., Krishnakumar S., Dhanalakshmi R. & Saliha B., 2005. Grouping of rice genotypes for salinity based upon grain yield and Na/K ratio coastal environment. *Agroc. Biol. Sci.* 1.
101. Ndiaye M. & Guindo D., 1998. Evolution des sols irrigués de la vallée Niger (Mali) Sodisation et alcalinisation sous riziculture. *Rapport.*
102. Pandey U. & Srivastava R., 1991. Leaf potassium as an index of salt tolerance in paddy. *Nat. Acad. Sci.*
103. Patricio Mendez del Villar C. M., 2011. Crise rizicole, évolution des marchés et sécurité alimentaire en Afrique de l'Ouest . *Rapport.*
104. Pearson G. & Bernstein I., 1959. Salinity effects at several growth stages of rice. *Argon.*
105. Pitman M. & Läuchli A., 2004. Global impact of salinity and agricultural ecosystems. *Salinity Environnement - Plants – Molecules*
106. Pitman M. G. & Läuchli A., 2002. Global impact of salinity and agricultural ecosystems. In K. Academic, *Salinity: Environment - Plants - Molecules.* the Netherlands.
107. Poehlman J. M. & Sleper D. A., 1995. Plant Breeders and their Work. Dans J. M. Poehlman, & D. A. Sleper, *Breeding Field crop* (pp. 3-15). Iowa State University Press / Ames
108. Purnendu G., Mannan M., Pal P., Maheb Hossain M., & Parvin S., 2004. Effect of salinity on some yield attributes of rice. *Pakistan Journal of Biological Sciences.*
109. Rahman MA, Thomson MJ, Shah-E-Alam M, de Ocampo M, Egdane J, Ismail AM., 2016. Exploring novel genetic sources of salinity tolerance in rice through molecular and physiological characterization. *Ann. Bot.*
110. Rajarathinam S., Koodalingam K. & Raja V., 1988. Effect of potassium and sodium in rice for tolerance of soil salinity. *J. Pot. Res.*
111. Rajendran K., Tester M. & Roy S., J. 2009. Quantifying the three main components of salinity tolerance in cereals. *Plant, Cell Environment.*

112. Sairam R. K. and Tyagi A., 2004. Physiology and molecular biology of salinity stress tolerance in plants. *Curr. Sci.* 86 : 407–421.
113. Saito K., Nelson A., Zwart S. J., Niang A., Sow A., Hiroe Y. & Wopereis M. C.S., 2013. Towards a Better Understanding of Biophysical Determinants of Yield Gaps and the Potential for Expansion of the Rice Area in Africa. In D. E. Marco CS Wopereis, *Realizing Africa's Rice Promise* pp. 188-203. CABI.
114. Sajjad M., 1984. Effect of increased salt stress on yield and yield components in rice. *Pak. J. Sci. Ind. Res.* 27, 292–294.
115. Scardaci S.C, Austine U.E, James E., Hill M.C. SHannan., Shannon M., & Rhoades, J. 1996. Water and soil salinity studies on California rice. *Rice Pub 2 Coop. Ext. Univ. California, Colusa.*
116. Seck P. A., Togola A., Touré A. & Diagne, A. 2013. Propositions pour une optimisation des performances de la riziculture en Afrique de l'Ouest. *Biological Sciences.*
117. Seck P. A., Touré A. A., Coulibaly J. Y., Diagne A., & Wopereis, M. C., 2013. Africa's Rice Economy Before and After Rice Crisis. Dans M. C. Wopereis, D. E. Johnson, N. T. Ahmadi, & A. E. Jalloh, *Realizing Africa's Rice Promise* (pp. 24 - 34). *AfricaRice Cotonou Bénin: CAB International* 2013.
118. Senadhiraa D., Zapata-Arias F., Gregorio G., Alejar M., Cruz H., Padolina T., & Galvez A., 2002. Development of the first salt-tolerant rice cultivar through indica/indica anther culture. *Field Crops Research - Volume 76*, 89-222.
119. Shabala S., & Cuin T. 2007. Potassium transport and plant salt tolerance. *Physiol. Plant.*
120. Shannon M., 1997. Adaptation of plants to salinity. *Adv in Agron* 60, 75-120.
121. Shimose N., 1963. Physiology of salt injury in crops. I. Effect of iso-osmotic pressure due to sodium chloride on the growth and absorption of minimal elements by rice plant. *J Sci Soil.*
122. Sié M., Dogbé S. & Diatta M., 2009. Sélection variétale participative du riz - Manuel du technicien. *AfricaRice.*
123. Singh A. K., Ansari M. W., Pareek H. A. & Sneh L. S.P., 2008. Raising salinity tolerant rice: recent progress and future perspectives. *Physiol. Mol. Biol. Plants*, 14 (1&2)
124. Singh R. & Flowers T., 2010. The physiology and molecular biology of the effects of salinity on rice. Pessarakli M, editor. *Handbook of plant and crop stress.*
125. Singh R.K., Murori R., Alexis N., Joseph B., Kimani J.M., Kaneyka Z.L., Surapong S., Innocent N., Jimmy L., Mkuya M.S., Tusekelege H. and Joseph R., 2013. Rice Breeding Activities in Eastern and Southern Africa. *SABRAO J. of Breeding and Genetics.* 45: 73-83.

126. Stern W. G. & Voight L., 1959. Effect of salt concentration on growth of red mangrove in culture. *Bot. Gaz.*, 121, 36-39.
127. Tester M. & Davenport R., 2003. Na⁺ transport and Na⁺ tolerance in higher plants. *Ann. Bot. (Lond.)*, 91, 503 - 527.
128. Thiaka Diouf, 1988. Programme Agrophysiologique. Rapport ISRA
129. UNESCO, 1952. Croissance des plantes en milieu salin. Rapport.
130. USAID, 2008. Synthèse des plans de sécurité alimentaires des communes du cercle de BLA. Rapport PROMISAM.
131. Viswanathan C., Jagendorf A., Zhu J.K., 2005. Understanding and improving salt tolerance in Plants. *Crop Science*
132. Winicov I., 1998. New molecular approaches to improving salt tolerance in crop plants. *Ann. Bot.* 82(6), 703 - 710.
133. Yamaguchi T. & Blumwald E., 2005. Developing salt-tolerant crop plants: challenges and opportunities. *Trends Plant Sci.*
134. Yamaguchi T. & Blumwald E., 2006. Developing salt-tolerant crop plants: challenges and opportunities. *Trends Plant Sci* 10(12), 615 - 620.
135. Yeo A. & Flowers S., 1990. Screening of rice (*Oriza sativa* L.) genotypes for physiological characters contributing to salinity resistance, and their relationship to overall performance. *Theor Appl Genet* 79, 377-384.
136. Yoshida S., 1981. Fundamentals of rice crop science. Los banos, Phillipines: IRRI.
137. Zeng L. & Shannon M. C., 2000. Salinity effects on Seedling Growth and Yield Components of Rice. *Crop Science*.
138. Zeng L., Shannon M. & Grieve C., 2002. Evaluation of salt tolerance in rice genotypes by multiple agronomic parameters. *Kluwer Academic*, 235-245.
139. Zheng B., Yang L., Zhang W., Mao C., Wu Y., Yi K., . . . Wu P., 2003. Mapping QTLs and candidate gene for rice root traits under different watersupply conditions and comaprative analysis across three populations. *Theor, Appl. genet.*, 207.
140. Zhu J., 2001. Plant salt tolerance. *Trends Plant Sci.*
141. Zid E., & Grignon C., 1991. Les tests de sélection précoce pour la résistance des plantes au stress. Cas des stress salin et hydrique. Dans E. Zid, & C. Grignon, *L'amélioration des plantes pour l'adaptation aux milieux arides* (pp. 91-108). Paris: AUPELF-UREF.

ANNEXES

ANNEXES

I. PUBLICATIONS

1) ARTICLE PUBLIE

Effets de la salinité au champ sur des paramètres agronomiques de 23 variétés de riz
Bioscience - <http://dx.doi.org/10.4314/jab.v103i1.7>

2) **ARTICLE ACCEPTE**

Evaluation participative de variétés de riz dans les zones salées du Sénégal, Mali et de la Gambie

TROPICULTURA le 12/11/2015

3) ARTICLES SOUMIS

1. Criblage de variétés riz dans différentes conditions de salinité durant leur phase végétative

Soumis à Agronomie Africaine le 15/08/2016

2. Mécanismes physiologiques de tolérance a la salinité de variétés de riz

CONNAISSANCE SAVOIR le 15/08/2016

3. Riziculture et salinité

Soumis à Cahiers d'Agricultures le 12/08/2016

II. POSTERS

EVALUATION AGRONOMIQUE MULTI-SAISONS DE NOUVELLES VARIETES DE RIZ DANS LA VALLEE DU FLEUVE SENEGAL

O. Nd Faye¹, A. Dieng², T. Gueye²

Doctorant en Agronomie/Sélection : Omar Ndaw FAYE

JOURNEES SCIENTIFIQUES, SPORTIVES ET CULTURELLES DE L'UNIVERSITE DE THIES – DOCTORIALE ED2DS LES 22, 23, 24 mai 2013

THEME GENERAL :

« Agriculture et Sécurité alimentaire : Enjeux et Perspectives pour le Sénégal »

PROGRAMME DES JOURNEES

RÉSUMÉ GENERAL

Le développement de la production rizicole en Afrique est devenu un sacerdoce pour les États. En Afrique de l'Ouest, on assiste à la course vers l'autosuffisance en riz, avec des programmes d'aménagements hydro agricoles, d'innovations de technologies agricoles et de renforcement de toute la chaîne de valeur. Cette dynamique enclenchée après la crise du riz de 2007/2008, nécessite l'accompagnement d'une recherche soutenue qui anticipe sur les problèmes de productions, en développant de nouvelles stratégies d'adaptation durables. La salinité des sols fait partie des contraintes majeures à la production rizicole. A partir d'une approche de sélection variétale participative, des essais de criblage de variétés de riz pour la salinité ont été conduits au Sénégal, en Gambie et au Mali. Les résultats ont permis de classer les variétés par pays et confirmé les performances de quelques-unes choisies par les producteurs. 16 variétés sélectionnées et 8 autres variétés ajoutées ont été par la suite évaluées au champ dans quatre environnements de soit, soit 0 ; 3 ; 6 et 9 dS/m. La classification de K-means suivant les incidences du sel sur les paramètres agronomiques a permis de classer les variétés. En serre, l'étude des réactions agro morphologiques des variétés durant leur phase végétative a permis de montrer une incidence croissante en valeur absolue de la salinité sur les paramètres étudiés. L'analyse des concentrations en Na⁺ et en K⁺ dans différentes parties des variétés a montré les mécanismes de tolérance à la salinité tels que la restriction de l'entrée des ions sodium au niveau racinaire, le transfert des ions toxiques vers la tige et les feuilles âgées et l'ajustement ionique avec le potassium. Cette série d'essais a permis d'avoir une liste de variétés élités tolérantes à la salinité : D14 ; WAS 73-B-B-231-4 ; IR 59418-7B-21-3 ; 72593-B-3-2-3-8 et IR 71991-3R-2-6-1.

Mots clés : riz, salinité, mécanismes de tolérance, sélection variétale participative, Afrique de l'Ouest

GENERAL ABSTRACT

Rice development in Africa has become a priesthood for the States. In west Africa, it's now the race towards rice self-sufficiency by the hydro-agricultural development programs, agricultural technologies innovations and strengthening value chain. This dynamic, triggered after the 2007/2008 rice crisis, requires the support of sustained research that anticipates production problems and develops new sustainable adaptation strategies. Soil salinity is one of the major constraints to rice production. Screening trials with 40 rice varieties for salinity were conducted in Senegal, Mali and Gambia by a participatory varietal selection approach. The results permitted to classify the varieties by country and confirmed the performances varieties selected by producers. 16 varieties selected in this trial and 8 added were evaluated in the field in four salinity environments: 0; 3; 6 and 9 dS / m. K-means classification according salinity incidence on the agronomic parameters permitted to classify the varieties. In greenhouse, the agro morphological reactions study of varieties during their vegetative phase showed an increasing salinity incidence in absolute value on parameters studied. Concentrations Na⁺ and K⁺ analyse in diferent varieties parts showed such as the restriction entry of sodium ions into the root level, the transfer of toxic ions to the stem and the aged leaves and the ionic adjustment with potassium. This series of tests yielded a list of elite varieties tolerant to salinity: D14; WAS 73-B-B-231-4; IR 59418-7B-21-3; 72593-B-3-2-3-8 and IR 71991-3R-2-6-1.

Key words: Rice, salinity, tolerance mechanism, participatory varietal selection, West Africa