

UNIVERSITE CHEIKH ANTA DIOP DE DAKAR
ECOLE DOCTORALE : SCIENCES DE LA VIE DE LA SANTE ET DE
L'ENVIRONNEMENT
FACULTE : SCIENCES ET TECHNIQUES

Année : 2016



N° d'ordre : 245

THESE DE DOCTORAT

Spécialité : Biotechnologies Végétales et Microbiennes et Amélioration des Plantes

Présentée par:

Dr Dioumacor FALL

Contribution à l'amélioration de la tolérance à la salinité de *Senegalia senegal* (L.) Britton, *Vachellia seyal* (Delile) P. Hurter et *Prosopis juliflora* (Swartz) DC par inoculation microbienne et apport de coques d'arachide

Soutenue le 03 décembre 2016 devant le jury composé de :

<u>Président</u> :	M. Kandoura NOBA	Professeur Titulaire (UCAD)
<u>Rapporteurs</u> :	M. Saliou NDIAYE	Maître de Conférences (UT/ENSA)
	M. Hassen GHERBI	Chargé de Recherches/HDR (IRD)
	M. Aboubacry KANE	Maître de Conférences (UCAD)
<u>Examineurs</u> :	M. Laurent LAPLAZE	Directeur de Recherches (IRD)
	M. El Hadji Samba Ndao SYLLA	Professeur Titulaire (UCAD)
	Mme Valérie HOCHER	Chargée de Recherches/HDR (IRD)
<u>Directeur de thèse</u> :	M. Diégane DIOUF	Maître de Conférences (UCAD)

UNIVERSITE CHEIKH ANTA DIOP DE DAKAR

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

FACULTE : SCIENCES ET TECHNIQUES

THESE DE DOCTORAT

Spécialité : Biotechnologies Végétales et Microbiennes et Amélioration des Plantes

Nom et prénom du candidat : FALL Dioumacor

Titre de la thèse : Contribution à l'amélioration de la tolérance à la salinité de *Senegalia senegal* (L.) Britton, *Vachellia seyal* (Delile) P. Hurter et *Prosopis juliflora* (Swartz) DC par inoculation microbienne et apport de coques d'arachide

Date et lieu de soutenance: 03 décembre 2016 à l'UCAD, Dakar-Sénégal

Président :	M. Kandioua NOBA	Professeur Titulaire (UCAD)
Membres:	M. Saliou NDIAYE	Maître de Conférences (UT/ENSA)
	M. Hassen GHERBI	Chargé de Recherches/HDR (IRD)
	M. Aboubacry KANE	Maître de Conférences (UCAD)
	M. Laurent LAPLAZE	Directeur de Recherches (IRD)
	M. El Hadji Samba Ndao SYLLA	Professeur Titulaire (UCAD)
	Mme Valérie HOCHER	Chargée de Recherches/HDR (IRD)
Directeur de thèse :	M. Diégane DIOUF	Maître de Conférences (UCAD)

Résumé

Au Sénégal, 1 700 000 ha sur les 3 800 000 ha des terres arables sont salés. Cette salinisation des terres provoque une dégradation de leurs propriétés biologiques, chimiques et physiques entraînant une diminution de leur fertilité et la disparition du couvert végétal naturel. Une amélioration des propriétés des sols salés et de la tolérance à la salinité des plantes, faciliterait la restauration de ces terres. Ainsi, notre travail a pour objectif global d'évaluer les potentialités de restauration et de valorisation des terres salées dans la région de Fatick par une approche intégrée notamment la combinaison de méthodes agronomiques et biologiques. Les travaux entrepris répondaient à trois objectifs spécifiques : (i) évaluer les niveaux et les mécanismes de tolérance à la salinité de *Senegalia senegal* (Syn. *Acacia senegal*), *Vachellia seyal* (Syn. *Acacia seyal*) et *Prosopis juliflora*; (ii) déterminer la dose optimale de coques d'arachide var 73-33 capable d'améliorer les propriétés des sols salés et la croissance de ces espèces en conditions salines et (iii) évaluer l'effet combiné de l'inoculation microbienne et de l'apport de coques d'arachide sur leur croissance en serre et en milieu réel sous conditions salines. Pour la germination, les concentrations 0, 5, 10, 15, 20, 25 et 30 g/l de NaCl ont été testées par contre pour la croissance, nous avons testé 0, 5, 10 et 15 g/l. Les résultats du premier objectif ont montré que le stress salin réduit le taux de germination sur boîtes de *Petri*, la croissance, les teneurs en chlorophylles et en eau, le potentiel hydrique foliaire, l'accumulation de K^+ et le rapport K^+/Na^+ des plants cultivés sur du sol non stérile en serre. En revanche, une augmentation de l'accumulation de la proline, des ions Na^+ et Cl^- a été notée dans les mêmes conditions de salinité. Pour des concentrations de NaCl inférieures ou égales à 15 g/l, le taux de germination est environ 100% et la croissance est relativement importante. La présence du gène NHX1 montre leur aptitude à séquestrer les ions Na^+ dans la vacuole. L'apport des coques (0, 4, 6 et 8 T/ha) améliore la croissance des plants, les teneurs en C, N, P totaux et réduit la conductivité électrique et la salinité du sol en serre. Cependant, les doses 6 et 8 T/ha réduisent la nodulation et la mycorhization des plants. En présence de 15 g/l NaCl, l'amendement avec 8 T/ha semble inhiber la croissance des plants. La dose 6 T/ha a permis la meilleure croissance des plants en conditions salines. Les résultats du dernier objectif ont montré que l'inoculation microbienne (rhizobia seuls, CMA seuls ou rhizobia + CMA), les coques d'arachide (6 T/ha) et leur combinaison améliorent la croissance, la nodulation et la mycorhization des plants cultivés sous conditions salines en serre et en milieu réel. Cependant, aucune différence significative n'a été notée entre les plants amendés avec les coques seules et ceux inoculés et amendés. Toutefois, la meilleure croissance et le meilleur taux de survie ont été obtenus avec la combinaison inoculation microbienne et coques d'arachide. Nos résultats suggèrent que *S. senegal* et *V. seyal* présentent une tolérance à la salinité à l'image de *P. juliflora* et que la combinaison de l'inoculation microbienne (rhizobia + CMA) et des coques d'arachide var 73-33 (6 T/ha) permet d'augmenter leurs potentialités à restaurer les sols affectés par la salinité au Sénégal.

Mot-clés : Salinité, espèces forestières, matière organique, rhizobia, champignons mycorhiziens, Sénégal

Thesis title: Contribution to the improvement of salt tolerance of *Senegalia senegal* (L.) Britton, *Vachellia seyal* (Delile) P. Hurter and *Prosopis juliflora* (Swartz) DC by microbial inoculation and peanut shells application

In Senegal, 1.7 million ha of the 3.8 million hectares of agricultural lands are salty. This salinization causes the degradation of soil biological, chemical and physical properties resulting to a decrease in fertility and the disappearance of natural vegetation. Improving the properties of saline soils and salt tolerance of plants will facilitate the restoration of these lands. Thus, the overall objective of our work was to evaluate the potential of restoration and improvement of saline lands in Fatick region through an integrated approach including the combination of agro-biological methods. The work had three specific objectives: (i) to assess the levels and mechanisms of salt tolerance of *Senegalia senegal* (Syn. *Acacia senegal*), *Vachellia seyal* (Syn. *Acacia seyal*) and *Prosopis juliflora*; (ii) to determine the optimal dose of peanut shells *var.* 73-33 able to improve the characteristics of salty soils and growth of these species under saline conditions and (iii) to evaluate the combined effect of microbial inoculation and peanut shells on growth greenhouse and natural environment under saline conditions. For germination, the concentrations 0, 5, 10, 15, 20, 25 and 30 g/l NaCl were tested and 0, 5, 10 and 15 g/l for seedlings growth. The results of the first objective showed that salt stress reduced the germination rate, growth, chlorophyll and water contents, leaf water potential, K^+ accumulation and K^+/Na^+ ratio of seedlings grown on non sterile soil under greenhouse condition. In contrast, an increase of proline, Na^+ and Cl^- accumulation was noted in leaves. For NaCl concentrations lower than or equal to 15 g/l, germination rate was about 100% and seedlings growth was relatively important. The presence of NHX1 gene showed their ability to sequester Na^+ ions in vacuole. Peanut shells (0, 4, 6 and 8 T/ha) improved seedlings growth, soil C, N, P contents and reduced electrical conductivity and salinity of soil. However, 6 and 8 T/ha reduced nodulation and mycorrhization of seedlings. In presence of 15 g/l NaCl, the amendment with 8 T/ha seemed to inhibit seedlings growth. The dose 6 T/ha provided the better seedlings growth under saline conditions. The results of our last objective showed that microbial inoculation (rhizobia + AMF), peanut shells (6 T/ha) and their combination improved growth, nodulation and mycorrhizal of seedlings grown under saline conditions in greenhouse and in natural conditions. However, no significant differences were noted between seedlings amended with peanut shells only and those inoculated and amended. However, the best growth and survival rate were obtained with the combination of microbial inoculation and peanut shells. Our results suggest that *S. senegal* and *V. seyal* exhibit salinity tolerance as *P. juliflora* and the combination of microbial inoculation (rhizobia + AMF) and peanut shells *var.* 73-33 (6 T/ha) allows to increase their potential to restore soils affected by salinity in Senegal.

Keywords: Salinity, forest species, organic matter, rhizobia, mycorrhizal fungi, Senegal

DEDICACES ET REMERCIEMENTS

DEDICACES

A la mémoire de ma grande mère Penda THIAO

Je dédie ce travail à

Mon père pour son estime

Ma mère pour son affection

Mon épouse Aïssatou Diouf pour sa compréhension et son soutien

Mon fils Babacar Fall (dit Petit Mbaye)

Mes frères et sœurs pour leur aide sans cesse

Mes amis

Tous les habitants de M'bellongouth

Ma belle famille

Ce travail est le vôtre

REMERCIEMENTS

Cette thèse s'inscrit dans l'Ecole Doctorale Science de la Vie, de la Santé et de l'Environnement (ED-SEV) dans la formation doctorale « Biotechnologies Végétales et Microbiennes et Amélioration des Plantes ». J'adresse mes sincères remerciements aux professeurs Ibrahima NDOYE et El Hadji Samba Ndao SYLLA, respectivement ancien et actuel responsable de cette formation doctorale. Ce travail a été effectué en partie au LCM-Laboratoire Commun de Microbiologie IRD/ISRA/UCAD (LCM) de Dakar (Sénégal) et au Laboratoire des Symbioses Tropicales et Méditerranéennes (LSTM) de Montpellier, je ne saurais entamer ce mémoire sans remercier ceux qui, de près ou de loin, ont contribué au bon déroulement du travail.

Tout d'abord je tiens à remercier infiniment l'Institut Sénégalais de Recherches Agricoles (ISRA) de m'avoir offert la possibilité de faire la nouvelle thèse mais également de m'avoir facilité le travail. Mes remerciements vont également aux bailleurs qui ont accepté de financer ce travail : le Fond d'Impulsion de la Recherche Scientifique et Techniques (FIRST), le LMI-LAPSE, la Fondation Internationale pour la Science (FIS) et l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD). Que les autorités et le personnel de ces organismes ou fonds trouvent ici l'expression de mes sincères remerciements et ma grande reconnaissance.

Je remercie vivement Dr Djibril SANE et Dr Mame Samba MBAYE respectivement ancien et actuel Chef du Département de Biologie Végétale de l'Université Cheikh Anta DIOP de Dakar, qui m'ont offert l'opportunité de m'inscrire dans leur département. Mes vifs remerciements vont également aux différents directeurs du CNRF à savoir Mr Abdourahmane TAMBA, Mr Ibrahima THOMAS et Dr Diaminatou SANOGO pour m'avoir facilité la tâche. Aux docteurs Saliou FALL et Robin DUPONNOIS, respectivement responsable du LCM et du LSTM.

J'exprime ma profonde gratitude à mon Directeur de thèse, Dr Diégane DIOUF qui n'a ménagé aucun effort pour la réalisation de ce travail mais aussi qui a bien voulu partager avec moi ses connaissances et son savoir-faire. Vous avez fait preuve d'un soutien moral sans faille. Tout au long de ma formation à la recherche à commencer par mon DEA, j'ai pu bénéficier de ton expérience, de tes qualités sociales, scientifiques et de tes conseils judicieux. Ta rigueur scientifique et tes encouragements m'ont été et me seront toujours bénéfiques. Je n'ai pas pu trouver les mots qu'il me faut pour te remercier seulement je te dis " merci beaucoup, thank you very much, Gracias muchos, a ndiarama, choukrane, Diokka ndial ".

J'exprime également ma reconnaissance à Dr Valérie HOCHER qui est à l'origine de mon séjour au LSTM et d'avoir accepté de m'encadrer sur les aspects moléculaires ; un sujet presque vierge sur les trois espèces faisant l'objet de notre étude. Votre disponibilité et votre gentillesse m'ont profondément touché. J'ai également une pensée très particulière à Dr Diamel GULLY pour sa rigueur dans le travail et son appui technique.

Je remercie Prof. Kandioura NOBA qui m'a fait l'insigne honneur de présider ce jury. Mes sincères remerciements vont aux rapporteurs de la thèse: Dr Aboubacry KANE, Dr Saliou NDIAYE, Dr Hassen GHERBI mais également aux membres du jury : Prof. El Hadji Samba Ndao SYLLA et Dr Laurent LAPLAZE.

A tous les enseignants du Département de Biologie végétale de l'UCAD qui m'ont enseigné et fait aimer la biologie végétale. J'ai une pensée très particulière à feu Dr Nicolas DIALLO. Que le Tout Puissant l'accueille dans son paradis éternel.

A tous les chercheurs du Laboratoire Commun de Microbiologie IRD/ISRA/UCAD : Dr Mansour THIAO (mon grand), Dr Abdala DIEDHIOU (mon cher), Dr Ramatoulaye Thiaba Samba MBAYE (ma sœur), Dr Adama DIOUF, Dr Nathalie DIAGNE, Dr Tatiana Krassova WADE, Dr Sergio, Dr Niokhor BAKHOUM, Dr Fatoumata FALL, Dr Fatou DIOUF, Dr Fatou NDOYE, Dr Ibou

DIOP, Dr Abdoulaye SOUMARE, Dr Seynabou SENE, Dr Mariama NGOM pour leur sympathie et les moments de détente.

A mes collègues du CNRF : Dr Mayécor DIOUF, Dr Tamsir MBAYE (mon parte), Dr Marème Fall BA, Dr Mamoudou TOURE, Dr Adja Madjiguène DIALLO, Dr Moussa DIENG, Dr Babou NDOUR, Dr Malayni DIATTA, Dr Ismaila DIALLO, Mr. Soulèye BADIANE, Mr. Moustapha DIEYE, Mr Cheikh O. SAMB, Mme Halimatou BA, Mr Momar WADE, Mr Abdou MBAYE et aux membres de la commission forestière du CST de l'ISRA, Dr Papa Ndièngou SALL et Sibiri Jean OUEDRAOGO pour leurs apports scientifiques.

Merci à tout le personnel du LCM : Mathieu FAYE, Cheikh NDIAYE, Marie Claire Da SILVA, Maimouna CISSOKHO (May May), Paul TENDENG Francis doREGO. A tout le personnel du CNRF : Mohamed DRAME, Cheikh WADE, Momar BEYE, Fatou FALL, Ndew CISSE, Sokhna FALL, Ndèye NDIAYE, Cheikh DIOUF, El Hadji DIOUF, Daour WADE, Souleymane DIENG, Ibou COLY, Thérance MANGA, Younouss CAMARA, ...

Je profite de l'occasion pour remercier tous les doctorants et stagiaires du LCM, CNRF et LSTM (en particulier UMR DIADE). Une mention spéciale à Naima du LSTM pour les milieux de cultures.

A mes camarades de promotion : Dr Mbaye TINE, Dr Issa FAYE, Mr Mansour GNING, Dr Fatou Guèye, Dr Bassirou SINE.

A tous les habitants de Sadioga en particulier Issa SENGHOR qui nous ont offert une parcelle d'un hectare pour notre essai en milieu réel.

Enfin j'adresse mes vifs remerciements à ma famille et à Samba Diouf (qui a pu convaincre mes parents pour que je fasse l'école), à Kéba DIALLO, à la famille SECK aux Maristes Cité BHS Villa 32, à Dr Fatima NDIAYE et Mme Daga NDIAYE.

SOMMAIRE

Sommaire

Introduction générale	1
Chapitre I: Synthèse bibliographique	4
I. Généralités sur la salinisation des terres	4
I.1. Définition de la salinité et de la salinisation des terres	4
I.2. Les causes de la salinité des terres	5
I.3. Effets de la salinité sur le sol.....	6
I.3.1. Sur les propriétés biologiques	6
I.3.2. Sur les propriétés chimiques.....	7
I.3.3. Sur les propriétés physiques	8
I.4. Effets de la salinité sur les végétaux	9
II. Mécanismes d'adaptation des plantes au stress salin	10
II.1. L'ajustement osmotique.....	11
II.2. L'exclusion des ions Na ⁺	11
II.3. L'inclusion et la compartimentation des ions Na ⁺	12
III. Méthodes de restauration et/ou de valorisation des terres salées au Sénégal	13
III.1. Les méthodes mécaniques ou physiques	13
III.2. Les méthodes agronomiques	14
III.3. Les méthodes chimiques.....	15
III.4. Les méthodes biologiques	16
IV. Rôles des amendements organiques dans la restauration des sols salés	17
IV.1. Effet de l'amendement organique sur les propriétés biologiques des sols	17
IV.2. Effet de l'amendement organique sur les propriétés chimiques des sols	19
IV.3. Effet de l'amendement organique sur les propriétés physiques des sols.....	19
V. Rôles des symbioses microbiennes dans l'amélioration de la tolérance des plantes à la salinité	20
V.1. Généralités sur les symbioses microbiennes végétales.....	20
V.1. 1. La symbiose rhizobienne.....	20
V.1. 2. La symbiose actinorhizienne.....	21
V.1.3. La symbiose mycorhizienne	22
V.2. Effet de l'inoculation microbienne sur la tolérance des plantes à la salinité	23
V.2.1. L'inoculation rhizobienne.....	23
V.2.2. L'inoculation avec les Frankia	23
V.2.3. L'inoculation mycorhizienne	23
V.2.3. La double inoculation (rhizobienne ou actinorhizienne + mycorhizienne)	24
VI. Caractères généraux des espèces étudiées	25
VI.1. <i>Senegalia senegal</i> (L.) Britton, « Syn. <i>Acacia senegal</i> (L.) Willd »	25
VI.2. <i>Vachellia seyal</i> (Delile) P. Hurter « Syn. <i>Acacia seyal</i> »	27
VI.3. <i>Prosopis juliflora</i> (Sw.) DC.	29
Chapitre II : Etude des niveaux et mécanismes de tolérance à la salinité de <i>Senegalia senegal</i> (L.) Britton, <i>Vachellia seyal</i> (Delile) P. Hurter et <i>Prosopis juliflora</i> (Swartz) DC	31
Partie 1: Etude des niveaux et mécanismes physiologiques de tolérance à la salinité de <i>Senegalia senegal</i> (L.) Britton, <i>Vachellia seyal</i> (Delile) P. Hurter et <i>Prosopis juliflora</i> (Swartz) DC	32
I. Introduction	32

II. Matériel et méthodes	33
II. 1. Etude de l'effet de la salinité sur la germination	33
II. 2. Etude de l'effet de la salinité sur la croissance et les paramètres physiologiques	34
III. Résultats	36
III.1. Effet du NaCl sur la germination des graines	36
III.2. Effet du NaCl sur la croissance des espèces	36
III.3. Effet du NaCl sur quelques paramètres physiologiques des espèces	38
III.4. Effet du NaCl sur l'accumulation des ions Cl ⁻ , Na ⁺ et K ⁺ entre les racines et les feuilles....	39
III.5. Indices de tolérance à la salinité.....	41
V. Discussion	42
VI. Conclusion et perspectives	44
Partie 2: Etude des mécanismes moléculaires de tolérance à la salinité de <i>Senegalia senegal</i> (L.) Britton, <i>Vachellia seyal</i> (Delile) P. Hurter et <i>Prosopis juliflora</i> (Swartz) DC	46
I. Introduction	46
II. Matériel et méthodes	47
II.1. Matériel végétal	47
II.2. Extraction des ARN totaux	48
II.3. Obtention des ADNc par transcription réverse	49
II.4. Démarche de recherche de séquences chez <i>S. senegal</i> , <i>V. seyal</i> et <i>P. juliflora</i>	50
II.4.1. Amplification de l'actine et de <i>NHX1</i> chez <i>S. senegal</i> , <i>V. seyal</i> et <i>P. juliflora</i> par PCR avec amorces dégénérées	50
II.4.2. Purification, clonage et séquençage.....	51
II.5. Test de l'efficacité des amorces pour qPCR.....	52
III. Résultats	53
III.1. Obtention d'ARN de feuilles et racines pour <i>S. senegal</i> , <i>V. seyal</i> et <i>P. juliflora</i>	53
III.2. Amplification de l'actine et du gène <i>NHX1</i> chez <i>S. senegal</i> , <i>V. seyal</i> et <i>P. juliflora</i>	55
III.2.1. L'actine	55
III.2.2. Le gène <i>NHX1</i>	57
III.3. Efficacité des amorces qPCR chez <i>P. juliflora</i>	58
IV. Discussion, conclusion et perspectives	58
Chapitre III : Détermination de la dose de coques d'arachide pour améliorer la croissance de <i>Senegalia senegal</i> (L) Britton, <i>Vachellia seyal</i> (Delile) P. Hurter et <i>Prosopis juliflora</i> (Swartz) DC en conditions salines et la fertilité des sols salés	60
I. Introduction	61
II. Matériel et méthodes	62
II.1. Préparation du substrat de culture.....	62
II.2. Culture des plants et application du stress salin.....	63
II.3. Evaluation de l'effet des coques d'arachide sur les caractéristiques des sols salés	64
II.4. Analyse statistique des données.....	64
III. Résultats	65
III.1. Effet des coques d'arachide sur la croissance des plants en conditions salines	65
III.2. Effet des coques d'arachide sur quelques paramètres physiologiques des plants en conditions salines	69
III.3. Effet des coques d'arachide sur les symbioses rhizobienne et endomycorhizienne des plants en conditions salines.....	72

III.4. Effet des coques d'arachide sur les caractéristiques chimiques et microbiologiques des sols salés	74
IV. Discussion.....	78
V. Conclusion et perspectives	80
Chapitre IV : Evaluation de l'effet combiné de l'inoculation microbienne et des coques d'arachide sur la croissance de <i>Senegalia senegal</i> (L.) Britton, <i>Vachellia seyal</i> (Delile) P. Purter et <i>Prosopis juliflora</i> (Swartz) DC en conditions salines	82
I. Introduction.....	84
II. Matériel et méthodes.....	85
II.1. Sélection d'un inoculum microbien pour améliorer la croissance des espèces en conditions salines	85
II.1.1. Dispositif expérimental.....	85
II.1.2. Evaluation des paramètres de croissance et physiologiques.....	86
II.1.3. Evaluation des symbioses microbiennes.....	87
II.2. Etude de l'effet combiné de l'inoculation microbienne et des coques d'arachide sur la croissance des espèces en conditions salines.....	87
II.2.1. Expérimentation en serre	87
II.2.2. Expérimentation en milieu réel.....	88
II.3. Analyse statistique des données.....	90
III. Résultats.....	90
III.1. Sélection d'un inoculum microbien pour améliorer la croissance des espèces en conditions de stress salin.....	90
III.1.1. Etude de l'effet de l'inoculation microbienne sur la croissance des espèces	90
III.1.2. Etude de l'effet de l'inoculation microbienne sur le statut hydrique des espèces en conditions de stress salin.....	94
III.1.3. Etude de l'effet de l'inoculation microbienne sur la nodulation et la mycorhization des espèces en conditions de stress salin.....	95
III.2. Evaluation de l'effet combiné de l'inoculation microbienne et des coques d'arachide sur la tolérance à la salinité des espèces.....	97
III.2.1. Effet de l'inoculation microbienne et des coques d'arachide sur la croissance des plants en serre sous conditions de stress salin	97
III.2.2. Effet de l'inoculation microbienne et des coques d'arachide sur la teneur relative en eau des plants en serre.....	99
III.2.3. Effet de l'inoculation microbienne et des coques d'arachide sur la nodulation et la mycorhization des plants en serre	100
III.2.4. Effet de l'inoculation microbienne et des coques d'arachide sur la croissance des plants en milieu réel	102
IV. Discussion.....	104
V. Conclusion et perspectives	106
Discussion générale	108
Conclusion générale et perspectives	112
Références bibliographiques	115
ANNEXES.....	137

LISTE DES ABREVIATIONS ET SIGLES

Liste des abréviations et sigles

ADN : Acide désoxyribonucléique
ADNc : Acide désoxyribonucléique complémentaire
ARN : Acide ribonucléique
BEST : Bourses d'Echanges Scientifiques et Technologiques
BET : Bromure d'éthyidium
CE : Conductivité Electrique
CEC : Capacité d'Echange Cationique
CMA : Champignons mycorhiziens à arbuscules
CNRF : Centre National de Recherches Forestières
dATP : désoxyadénosine-triphosphate
dCTP : désoxycytidine-triphosphate
DERBAC : Projet de Développement Rural de la Basse Casamance
dGTP : désoxyguanidine-triphosphate
dNTP : désoxynucléotide-triphosphate
dNTP : désoxytimidine-triphosphate
EDTA : éthylènediamine tétracétate
ESP : Pourcentage de Sodium Echangeable
FDA : Fluoresceïn Diacétate
FIRST : Fond d'Impulsion de le Recherche Scientifique et Technique
FIS : Fondation Internationale pour la Science
INP : Institut National de Pédologie
IPTG : Isopropanol D-1 thiogalactopyranoside
IPTRID : International Programme for Technology and Research in Irrigation and Drainage
= Programme International pour la Technologie et la Recherche en Irrigation et en Drainage
IRD : Institut de Recherche pour le Développement
ISRA : Institut Sénégalais de Recherches Agricoles
IT : Indice de tolérance
Kb : kilobase ou kilo-paire de bases
LADA : Land Degradation Assessment
LAMA : Laboratoire des Moyens Analytiques
LB : Lysogeny Broth = bouillon lysogène
LMI-LAPSE : Laboratoire Mixte International-Laboratoire Adapatation des Plantes aux Stress Environnementaux
ORS : code donné aux rhizobia de la collection bactérienne du LCM-Laboratoire Commun de Microbiologie IRD/ISRA/UCAD de Dakar
PADERCA : Projet d'Appui au Développement Rural en Casamance
PAPIL : Projet d'Appui à la Petite irrigation Locale
PCR : Réaction de Polymérisation en chaine
PIDAC : Projet Intégré de Développement Agricole de la Basse Casamance
PROGERT : Projet de gestion et de restauration des Terres dégradées du Bassin Arachidier
PROGES : Projet pour la Gestion de l'Eau dans la zone Sud
ROS : reactive oxygen species = espèces réactives de l'oxygène

RT : Transcription réverse

SOC medium ou **SOB** : Super Optimal Broth = Milieu super optimal

Taq : *Thermus aquaticus*

TBE : Tris Borate EDTA

TRE : Teneur relative en eau

UCAD : Université Cheikh Anta Diop de Dakar

X-Gal : 5-bromo-4-chloro-3-indolyl-beta-D-galactopyranoside

LISTE DES TABLEAUX ET FIGURES

Liste des tableaux

Tableau 1: Classification des sols salés	4
Tableau 2 : Effets de quelques apports de matières organiques sur les propriétés des sols salés	18
Tableau 3: Caractéristiques physiques et chimiques du sol de Sadioga.....	34
Tableau 4: Effet de différentes concentrations de NaCl (0, 5, 10 et 15 g/l) sur le diamètre au collet, la hauteur, les biomasses aérienne et racinaire sèches des plants de <i>S. senegal</i> , <i>V. seyal</i> et <i>P. juliflora</i> cultivés pendant 4 mois en gaines	37
Tableau 5: Effet de différentes concentrations de NaCl (0, 5, 10 et 15 g/l) sur les teneurs en chlorophylles (a + b), en proline, la teneur relative en eau et le potentiel hydrique foliaire des plants de <i>S. senegal</i> , <i>V. seyal</i> et <i>P. juliflora</i> cultivés pendant 4 mois en gaines	38
Tableau 6: Teneur des éléments minéraux (g/kg de matière sèche) dans les racines et les feuilles des plants de <i>S. senegal</i> , <i>V. seyal</i> et <i>P. juliflora</i> cultivés pendant 4 mois en gaines sous 4 concentrations de NaCl (0, 5, 10 et 15 g/l)	40
Tableau 7: Indices de tolérance à la salinité (%) de <i>S. senegal</i> , <i>V. seyal</i> et <i>P. juliflora</i> aux stades germination et croissance (Biomasse aérienne sèche) après 4 mois de culture dans des gaines.	41
Tableau 8: Composition du mix pour la transcription réverse	49
Tableau 9: Amorces QPCR de l'actine et du gène NHX1 chez <i>P. juliflora</i>	53
Tableau 10 : Rendement en ARN totaux, ratios et RIN obtenus pour les différents échantillons d'ARN	55
Tableau 11 : Amorces dégénérées utilisées pour amplifier l'actine chez les trois espèces	55
Tableau 12 : Amorces dégénérées utilisées pour amplifier le gène NHX1 chez les trois espèces	57
Tableau 13 : Caractéristiques chimiques des coques d'arachide de la variété 73-33	62
Tableau 14 : Test de significativité des effets de la salinité, des coques d'arachide et de leur interaction sur la hauteur, le diamètre au collet, les biomasses aérienne et racinaire sèches des plants de <i>S. senegal</i> , <i>V. seyal</i> et <i>P. juliflora</i> cultivés en pépinière pendant 4 mois sur du sol non stérile	65
Tableau 15 : Test de significativité des effets de la salinité, des coques d'arachide et de leur interaction sur les teneurs en chlorophylle et en proline, la teneur relative en eau et le potentiel hydrique foliaire des plants de <i>S. senegal</i> , <i>V. seyal</i> et <i>P. juliflora</i> cultivés en pépinière pendant 4 mois sur du sol non stérile.....	70
Tableau 16 : Teneurs en chlorophylles et en proline des plants de <i>S. senegal</i> , <i>V. seyal</i> et <i>P. juliflora</i> cultivés pendant 4 mois en pépinière sous 4 conditions salines (0, 5, 10 et 15 g/l NaCl) sur du sol amendé avec des coques d'arachide (0, 4, 6 et 8 T/ha)	71
Tableau 17 : Teneur relative en eau (TRE) et potentiel hydrique foliaire (Ψ) des plants de <i>S. senegal</i> , <i>V. seyal</i> et <i>P. juliflora</i> cultivés pendant 4 mois en pépinière sous 4 conditions salines (0, 5, 10 et 15 g/l NaCl) sur du sol amendé avec des coques d'arachide (0, 4, 6 et 8 T/ha).....	72
Tableau 18 : Nombre de nodosités et taux de mycorhization des plants de <i>S. senegal</i> , <i>V. seyal</i> et <i>P. juliflora</i> cultivés pendant 4 mois en pépinière sous 4 conditions salines (0, 5, 10 et 15 g/l NaCl) sur du sol amendé avec des coques d'arachide (0, 4, 6 et 8 T/ha).....	73
Tableau 19 : Carbone total, azote total et phosphore total des sols amendés avec des coques d'arachide sur lesquels les plants de <i>S. senegal</i> ont été cultivés pendant 4 mois	75
Tableau 20 : pH, conductivité électrique (CE), somme des cations échangeables (SCE) et capacité d'échange cationique (CEC) des sols amendés avec des coques d'arachide sur lesquels les plants de <i>S. senegal</i> ont été cultivés pendant 4 mois	76

Tableau 21 : Activité microbienne totale et densité des spores des sols salés amendés avec des coques d'arachide sur lesquels les plants de <i>S. senegal</i> ont été cultivés pendant 4 mois	77
Tableau 22 : Caractéristiques physiques et chimiques du sol de la tanne herbeuse du site (Sadioga)	89
Tableau 23 : Test de significativité des effets de la salinité, de l'inoculation microbienne et de leur interaction (NaCl*Inoc) sur la hauteur, le diamètre au collet, les biomasses aérienne et racinaire sèches des plants de <i>S. senegal</i> , <i>V. seyal</i> et <i>P. juliflora</i> cultivés en pépinière pendant 5 mois sur du sol non stérile.....	91
Tableau 24 : Diamètre au collet, hauteur, biomasses aérienne et racinaire sèches des plants de <i>S. senegal</i> , <i>V. seyal</i> et <i>P. juliflora</i> cultivés en pépinière pendant 5 mois en conditions salines (0, 5, 10, 15 g/l NaCl) et inoculés avec des rhizobia et des CMA sur sol non stérile.....	92
Tableau 25 : Test de significativité des effets de la salinité (NaCl), de l'inoculation microbienne (Inoc.) et de leur interaction (NaCl*Inoc) sur la teneur relative en eau et le potentiel hydrique foliaire (Ψ) des plants de <i>S. senegal</i> , <i>V. seyal</i> et <i>P. juliflora</i> cultivés en pépinière pendant 5 mois sur du sol non stérile.....	94
Tableau 26 : Teneur relative en eau (%) et potentiel hydrique foliaire (MPa) des plants de <i>S. senegal</i> , <i>V. seyal</i> et <i>P. juliflora</i> cultivés en pépinière pendant 5 mois en conditions salines (0, 5, 10, 15 g/l NaCl) et inoculés avec des rhizobia et des CMA sur sol non stérile	95
Tableau 27 : Nodulation (N) et taux de mycorhization (TM %) des plants de <i>S. senegal</i> , <i>V. seyal</i> et <i>P. juliflora</i> cultivés en pépinière pendant 5 mois en conditions salines (0, 5, 10, 15 g/l NaCl) et inoculés avec des rhizobia et des CMA sur sol non stérile	96
Tableau 28 : Hauteur et diamètre au collet des plants de <i>S. senegal</i> , <i>V. seyal</i> et <i>P. juliflora</i> cultivés en serre pendant 4 mois en conditions salines (0, 5, 10, 15 g/l NaCl), doublement inoculés avec des rhizobia et des CMA et/ou amendés avec des coques d'arachide.....	97
Tableau 29 : Biomasse aérienne sèche (BAS) et biomasse racinaire sèche (BRS) des plants de <i>S. senegal</i> , <i>V. seyal</i> et <i>P. juliflora</i> cultivés en serre pendant 4 mois en conditions salines (0, 5, 10, 15 g/l NaCl), doublement inoculés avec des rhizobia et des CMA et/ou amendés avec des coques d'arachide	98
Tableau 30 : Nombre de nodosités et taux de mycorhization des plants de <i>S. senegal</i> , <i>V. seyal</i> et <i>P. juliflora</i> cultivés en serre pendant 4 mois en conditions salines (0, 5, 10, 15 g/l NaCl), doublement inoculés avec des rhizobia et des CMA et amendés avec des coques d'arachide	100
Tableau 31 : Hauteur, diamètre au collet et taux de croissance des plants de <i>S. senegal</i> , <i>V. seyal</i> et <i>P. juliflora</i> juste après plantation (août 2015) et 4 mois après plantation dans notre site d'étude (décembre 2015)	103

Liste des figures

Figure 1 : Répartition des terres salées au Sénégal (INP, 2009)	6
Figure 2 : Effet du sodium sur le complexe adsorbant	9
Figure 3 : Effet du NaCl sur la germination des espèces sur boîtes de <i>Petri</i> pendant 10 jours.....	36
Figure 4 : Absorbance des ARN totaux après traitement à la DNase.....	54
Figure 5 : Exemple de profil électrophorétique obtenu après analyse d'un échantillon d'ARN de racine de <i>S. senegal</i>	54
Figure 6 : Electrophorèse sur gel d'agarose des produits de PCR obtenus après amplification avec les couples d'amorces dégénérées actine.	56
Figure 7 : Electrophorèse sur gel d'agarose des produits de PCR obtenus après amplification avec les couples d'amorces dégénérées <i>NHX1</i>	57
Figure 8 : Courbes d'amplification (a) et de dissociation de l'actine chez <i>P. juliflora</i>	58

Figure 9 : Courbes d'amplication (a) et de dissociation (b) de NHX1 chez <i>P. juliflora</i>	58
Figure 10 : Diamètre au collet, hauteur (a), biomasses aérienne et racinaire sèches (b) des plants de <i>S. senegal</i> cultivés pendant 4 mois en serre sous 4 conditions salines (0, 5, 10 et 15 g/l NaCl) sur du sol amendé avec des coques d'arachide (0, 4, 6 et 8 T/ha)	66
Figure 11 : Diamètre au collet, hauteur (a), biomasses aérienne et racinaire sèches (b) des plants de <i>V. seyal</i> cultivés pendant 4 mois en serre sous 4 conditions salines (0, 5, 10 et 15 g/l NaCl) sur du sol amendé avec des coques d'arachide (0, 4, 6 et 8 T/ha)	67
Figure 12 : Diamètre au collet, hauteur (Fig. 3a), biomasses aérienne et racinaire sèches (Fig. 3b) des plants de <i>P. juliflora</i> cultivés pendant 4 mois en serre sous 4 conditions salines (0, 5, 10 et 15 g/l NaCl) sur du sol amendé avec des coques d'arachide (0, 4, 6 et 8 T/ha)	68
Figure 13 : Analyse en composantes principales (ACP) montrant les relations entre la conductivité électrique (CE), la salinité, le pH, le carbone total, l'azote total, le phosphore total, la densité des spores et l'activité microbienne totale et les 16 combinaisons de coques d'arachide et les concentrations de NaCl	78
Figure 14 : Dispositif expérimental en milieu naturel (Sadioga)	89
Figure 15 : Teneur relative en eau (%) des plants de <i>senegal</i> (A) , <i>V. seyal</i> (B) et <i>P. juliflora</i> (C) cultivés en serre pendant 4 mois en conditions salines (0, 5, 10, 15 g/l NaCl), doublement inoculés avec des rhizobia et des CMA et amendés avec des coques d'arachide	99
Figure 16 : Taux de survie des plants de <i>S. senegal</i> , <i>V. seyal</i> et <i>P. juliflora</i> 4 mois après transplantation (Décembre 2015) à Sadioga.	102

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

Au Sénégal, 1 700 000 ha sur les 3 800 000 ha des terres arabes sont salées (LADA, 2009). Les terres salées sont surtout localisées dans les régions administratives de Kaolack, Fatick, Kolda, Ziguinchor et dans le delta / moyenne vallée du Fleuve Sénégal. Plus du cinquième de ces terres salées se trouvent dans la région naturelle du Sine-Saloum (régions de Fatick et Kaolack) et plus particulièrement dans la région de Fatick. Cette salinisation des terres provoque une dégradation des propriétés biologiques, chimiques et physiques des sols (Qadir et Schubert, 2002). Ces terres arables sont progressivement remplacées par d'immenses étendues de zones salées (ou Tannes) (Boivin et Job, 1988). Les conséquences de cette dégradation des sols sont la diminution de leur fertilité ; qui entraîne la réduction des surfaces cultivables, des rendements des cultures, et parfois la disparition du couvert végétal naturel sur de vastes étendues. Ainsi, l'offre de services provenant des forêts naturelles (fruits forestiers, bois de chauffe et de service, fourrage,...) devient insuffisante pour satisfaire la demande. Ce phénomène accentue l'insécurité alimentaire et la pauvreté surtout en milieu rural.

Beaucoup d'efforts sont déployés pour lutter contre la salinisation des terres mais aussi pour la restauration et la valorisation des terres salées. Les techniques utilisées portent principalement sur les méthodes mécaniques (confection de diguettes et digues anti-sel), les méthodes agro-chimiques par amendement de matières organiques (épandage de coque d'arachide, de fumier, d'ordures ménagères,...) et chimiques (phosphogypse,...) et les méthodes biologiques par le reboisement avec des espèces forestières adaptées à la salinité. Malgré tous ces efforts, la superficie des sols affectés par le sel est à la hausse.

L'enfouissement de la matière organique permet, d'une part un recyclage des nutriments (Potassium, Calcium, Magnésium, Carbone,...) contenus dans la biomasse et d'autre part, le maintien d'un certain niveau de carbone organique dans le sol. Des études ont révélé que la coque d'arachide est riche en ions calcium. A une dose de deux (02) à quatre (04) tonnes/ha sur sol argileux et de huit (08) à dix (10) tonnes/ha sur sol sableux, la coque d'arachide peut contribuer de façon efficace à la réorganisation de la structure du sol et à l'amélioration de sa fertilité. Des résultats obtenus par le PROGERT (2006, 2007, 2008) ont montré que l'utilisation de la coque d'arachide permet d'augmenter les rendements du mil et du maïs cultivés sur sol salé.

L'amélioration de la fertilité des sols salés et l'installation d'espèces pionnières permettrait la reconquête des terres salées et le développement de la végétation herbacée (céréalière, fourragère,...). En effet, l'utilisation de plantes tolérantes au sel a été recommandée comme une approche intégrée de gestion appropriée des terres salées (Qadir et Oster, 2002; Öztürk *et al.*, 2006; Singh, 2009). Dans les zones salées du Sénégal, en particulier dans le Bassin Arachidier, malgré la disparition de la végétation sur de grandes superficies, il subsiste au sein de ces écosystèmes particuliers des îlots de *Vachellia seyal*, *Prosopis juliflora*, *Tamarix senegalensis* et *Senegalia senegal*. Ces espèces présentent des potentialités pour contribuer à la restauration et à la valorisation des terres salées. En effet, *S. senegal* et *V. seyal* présentent un taux de survie supérieur à 50%, dix ans après plantation dans les tannes arbustives de Djilass dans la région de Fatick (ISRA/CNRF, 2012). Cependant, pour une meilleure utilisation de ces espèces dans la restauration et la valorisation des terres salées, il s'avère nécessaire de connaître leur seuil et leurs mécanismes de tolérance à la salinité. En outre, il a été démontré que l'inoculation avec des microorganismes symbiotiques (rhizobiums et champignons mycorhiziens) efficaces améliore la croissance des plants en conditions de stress (Dommergues, 1995; Requena *et al.*, 2001; Diouf *et al.*, 2005 ; Thrall *et al.*, 2005, Manga *et al.*, 2007 ; Fall *et al.*, 2009 ; Diouf *et al.*, 2010).

Ainsi, ce travail de recherche a pour objectif global d'évaluer les potentialités de restauration et de valorisation des terres salées dans la région de Fatick par la combinaison de méthodes agro-biologiques comme le reboisement avec des légumineuses ligneuses à usages multiples (*S. senegal*, *V. seyal* et *P. juliflora*) et l'enfouissement de matière organique. Il s'articule autour de trois objectifs spécifiques :

1°) Evaluer les niveaux et les mécanismes de tolérance à la salinité de *S. senegal*, *V. seyal* et *P. juliflora* ;

2°) Déterminer la dose optimale de coques d'arachide capable d'améliorer les caractéristiques chimiques et microbiologiques des sols salés et la croissance de *S. senegal*, *V. seyal* et *P. juliflora* en conditions salines et

3°) Evaluer l'effet combiné de l'inoculation microbienne et de l'apport de coques d'arachide sur la croissance de *S. senegal*, *V. seyal* et *P. juliflora* en conditions salines.

Ce mémoire de thèse est organisé en quatre chapitres :

Le **chapitre I** est consacré à la synthèse bibliographique. Il fait le point sur les causes de la salinisation, ses effets sur le sol et les plantes, les mécanismes d'adaptation des plantes à la salinité. Il évoque également les méthodes de restauration des sols salés, les rôles des amendements organiques et des symbioses microbiennes dans la restauration des sols salés. Les caractères généraux des trois espèces (*S. senegal*, *V. seyal* et *P. juliflora*) constituent la dernière partie de ce chapitre.

Les activités de recherches effectuées dans le cadre de cette thèse, correspondant aux différents objectifs spécifiques susmentionnés, sont décrites dans les trois chapitres suivants (Chapitres **II** à **IV**). Les chapitres sont rédigés sous forme d'articles scientifiques présentés selon le format suivant: Introduction, Matériel et méthodes, Résultats, Discussion, Conclusion et perspectives.

Le **chapitre II** porte sur l'évaluation des niveaux et des mécanismes de tolérance à la salinité de trois espèces de légumineuses ligneuses à usages multiples (*Senegalia senegal*, *Vachellia seyal* et *Prosopis juliflora*). Ce chapitre est subdivisé en deux parties et a fait l'objet d'un article publié dans la revue *African Journal of Biotechnology*.

Le **chapitre III** est consacré à la détermination d'une dose de coques d'arachide capable d'améliorer les caractéristiques chimiques et microbiologiques des sols salés et la croissance de *S. senegal*, *V. seyal* et *P. juliflora* en conditions salines. Ce chapitre a fait l'objet d'un article qui sera soumis dans *Journal of Soil and Water Conservation*.

Le **chapitre IV** porte sur l'évaluation de l'effet combiné de l'inoculation microbienne et de l'apport de coques d'arachide sur la croissance de *Senegalia senegal*, *Vachellia seyal* et *Prosopis juliflora* en conditions salines. Ce chapitre fera l'objet deux articles qui seront soumis dans *Symbiosis et Agroforestry System*.

La dernière partie de cette thèse présente la discussion générale, les conclusions générales tirées de l'étude ainsi que les perspectives de recherches envisagées à l'issue de nos travaux pour la restauration et la valorisation des terres salées. Les résumés des articles scientifiques publiés ou en cours de rédaction et des communications présentées à dans des congrès nationaux et internationaux sont en annexe.

CHAPITRE I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

Chapitre I: Synthèse bibliographique

I. Généralités sur la salinisation des terres

Après défini la salinité et la salinisation des terres, nous évoquerons les principales causes de la salinité et ses effets salinité sur le sol et les plantes dans cette première partie de notre synthèse bibliographique.

I.1. Définition de la salinité et de la salinisation des terres

Dans le contexte de l'agriculture, la salinité peut être définie comme étant la quantité de sels dans le sol (Gorham, 1992). La salinisation peut être définie comme étant le processus d'accumulation des sels minéraux solubles dans le sol à des niveaux nuisibles pour les plantes (Tanji, 2004). Ces sels dissouts sont constitués d'un mélange de cations (Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} ,...) et d'anions (Cl^- , SO_4^{2-} , CO_3^{2-} , HCO_3^- ,...) (Tanji, 2004). La salinité d'un sol se mesure par la conductivité électrique (CE) d'un extrait de pâte diluée. La conductance est inversement proportionnelle à la résistance électrique (ohms) et la mesure brute est donnée en mhos ($1 \text{ mmhos cm}^{-1} = 1 \text{ dS m}^{-1}$). Un sol est considéré comme salé lorsque sa conductivité électrique est supérieure à 4 déci-siemens par mètre (dS/m) correspondant à 40 mM de NaCl soit 2,4 g/l (Hillel, 2005). Le tableau 1 montre la classification des sols salés en fonction de la conductivité électrique (Loyer et Le Brusq, 1982 ; Daffé et Sadio, 1988).

Tableau 1: Classification des sols salés

Conductivité électrique (dS m⁻¹)	Appréciation
CE ≤ 4	Sol non salé
4 < CE ≤ 15	Sol salé
15 < CE ≤ 35	Sol très salé
CE > 35	Sol sursalé

Rappel : $1000\mu\text{S/cm} = 1 \text{ mS/cm} = 1 \text{ mmhos/cm}$

I.2. Les causes de la salinité des terres

La salinité des terres peut résulter de processus naturels (**salinisation primaire**) ou être induite par des activités humaines ou anthropiques (**salinisation secondaire**) (Ghassemi *et al.*, 1995) :

- La salinisation primaire

Près de 80 % des terres salinisées ont une origine naturelle (FAO et IPTRID, 2006) et sont qualifiées de salinisation «primaire». Elle résulte d'une accumulation progressive des ions nécessaires à la formation des sels solubles. Ces ions sont libérés suite à une altération de certaines roches sédimentaires, volcaniques et hydrothermales (Loyer, 1991) ou à partir d'accumulations salines anciennes (Munns, 2009). L'intrusion d'eaux marines dans les zones côtières est aussi une autre source d'accumulation d'ions. Les sels libérés sont transportés par des eaux souterraines. Ils sont accumulés à la surface des zones basses où le taux d'évapotranspiration est élevé (Pitmani et Lauchli, 2004). En effet, la salinisation primaire se produit naturellement lorsque le matériel d'origine du sol est riche en sels solubles ou en présence d'une nappe phréatique salée peu profonde. Pendant la saison sèche, les fortes températures à la surface provoquent l'évaporation de la solution du sol et entraînent une remontée par capillarité de la nappe salée qui accroît la concentration des sels en surface et augmente ainsi la salinité des horizons de surface (Munns *et al.*, 2006). La grande mobilité des ions Cl^- et Na^+ expliquerait les fortes concentrations de sels à la surface des *tannes* (Sadio, 1991). La salinisation des terres au Sénégal résulte essentiellement des différentes phases climatiques qui se sont succédées au quaternaire et qui ont provoqué l'envahissement du continent par les eaux marines (Sadio, 1991). A cela s'ajoute, l'effet des changements climatiques, notamment le déficit pluviométrique des années 1970 et l'élévation du niveau marin (intrusion marine, inondations,...), qui ont en outre contribué à accentuer les effets de la salinité en aval des principaux bassins versants du Sénégal (le Sénégal, le Sine, le Saloum et la Casamance) (Sadio, 1991 ; Zeng, 2003). La figure 1 montre la répartition des sols au Sénégal.

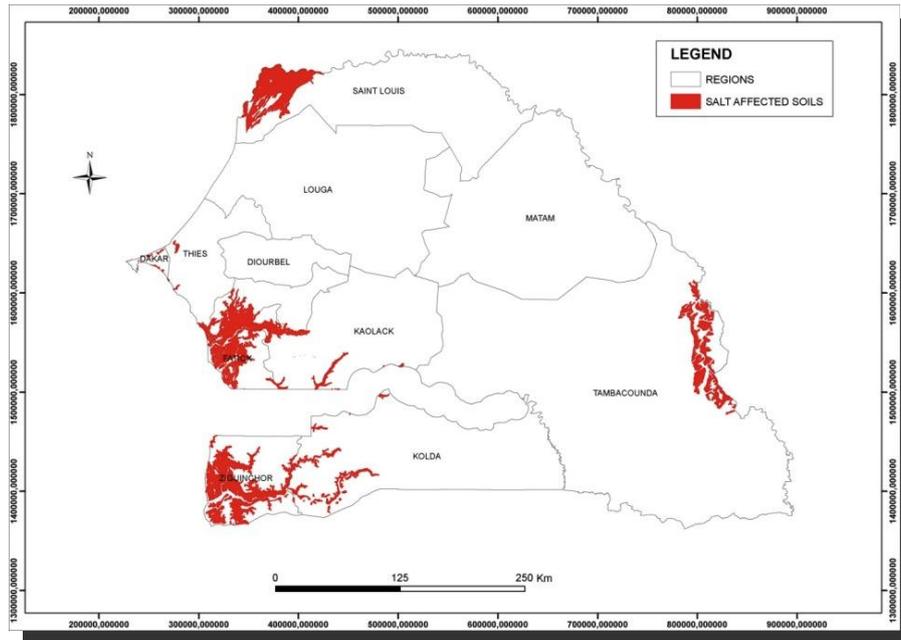


Figure 1: Répartition des terres salées au Sénégal (INP, 2009)

- La salinisation secondaire

Près de 20% des terres salinisées ont une origine anthropique (FAO et IPTRID, 2006) et sont qualifiées de «secondaires». Elle est le résultat d'accumulation des sels apportés par des activités humaines. L'irrigation (avec de l'eau de faible qualité) est la principale cause anthropique de la salinisation des sols (Anonyme, 2006). Elle conduit à la salinisation des terres, en particulier dans les régions arides et semi-arides (Munns, 2009). En effet, les quantités d'eau apportées au fil du temps entraînent un dépôt cumulé de sel dans les sols (Ghassemi *et al.*, 1995 ; Marlet, 2005). Cette salinisation secondaire peut être aussi induite par l'utilisation d'intrants agricoles, les barrages, etc (Loyer, 1991).

I.3. Effets de la salinité sur le sol

Les fortes teneurs en sels peuvent influencer négativement les propriétés biologiques, chimiques et physiques du sol.

I.3.1. Sur les propriétés biologiques

La salinité peut perturber le nombre de microorganismes et leurs fonctions dans le sol. Plusieurs études ont montré l'effet négatif de la salinité sur la biomasse microbienne totale, la biomasse fongique et l'ergostérol fongique (Sardinha *et al.*, 2003 ; Rietz et Haynes, 2003 ; Walpola et Arunakumara, 2010). En outre, Garcia et Hernandez (1996) ont montré que

l'augmentation de la salinité inhibe plusieurs activités enzymatiques du sol, telles que les activités phosphatase alcaline et β -glucosidase. Toutefois, Chandra *et al.* (2002) ont souligné qu'à faible concentration, les sels ont un effet stimulant sur la minéralisation du carbone, mais peuvent devenir toxiques pour les micro-organismes avec des concentrations croissantes.

I.3.2. Sur les propriétés chimiques

La salinité affecte les propriétés chimiques du sol tels que le pH, la capacité d'échange cationique (CEC), le pourcentage de sodium échangeable (ESP), le carbone organique et modifie le potentiel osmotique et matriciel du sol (Wang *et al.*, 2014).

- Le pH

Le pH est une mesure de l'acidité ou de l'alcalinité du sol. Plus précisément, il s'agit d'une mesure de la concentration en ions hydrogène dans une solution aqueuse et sa valeur varie dans les sols de 3,5 (très acide) à 9,5 (très alcalin). L'augmentation de la concentration en sels ou ion solubles entraîne une alcalinisation du milieu. En effet, il existerait une compétition entre les ions Na^+ et H^+ , ce qui provoquerait une augmentation du pH du milieu.

- La capacité d'échange cationique (CEC)

La CEC est une mesure de la quantité de charges négatives présentes sur les surfaces minérales et organiques du sol. Elle représente la quantité de cations (Na^+ , Mg^{2+} ; Ca^{2+} et K^+) qui peuvent être retenus par ces surfaces. Elle est exprimée en centimoles d'hydrogène par kilogramme (c molc/kg ou 100 meqc/100g). La CEC est utilisée comme mesure de la fertilité, de la capacité de rétention des éléments nutritifs. Une CEC élevée permet au sol de retenir une grande quantité de nutriments pour une utilisation par les plantes. Par contre un sol à basse CEC ne peut retenir qu'une faible quantité de nutriments sur les sites d'échanges. Les nutriments appliqués au sol en excès peuvent être facilement lessivés par les pluies ou eaux d'irrigation en surplus. Les fortes salinités entraînent une augmentation de la concentration des cations échangeables tel que le Na^+ .

- Le pourcentage de sodium échangeable (PSE)

Dans les sols salés, les ions échangeables de Na^+ sont liés aux charges négatives de l'argile, donc, ce qui provoque une défloculation des particules argileuses. Les fortes teneurs en Na^+ échangeables peuvent conduire à un gonflement et la dispersion des argiles, ainsi que la

rupture des agrégats du sol (Lauchli et Epstein, 1990). Ces phénomènes peuvent entraîner à la fois une réduction de la capacité d'infiltration et de rétention d'eau des sols. Les sols salés sont plus faciles à récupérer que les sols sodiques, parce que, généralement, les premiers exigent le lessivage des sels solubles, tandis que les seconds nécessitent une source de Ca^{2+} pour remplacer l'excès de Na^+ .

I.3.3. Sur les propriétés physiques

- La structure du sol

La structure du sol peut être définie comme le mode d'agencement des particules primaires du sol dans les agrégats. Elle gouverne d'une part, la pénétration des racines dans le sol et d'autre part le déplacement de l'eau et des éléments nutritifs de la masse du sol vers les racines (Lavelle et Spain, 2001). L'augmentation de la quantité de sodium dans un sol entraîne la destruction de sa structure. En effet, un excès de sodium favorise la dispersion des colloïdes minéraux et par conséquent la réduction de la structure poreuse du sol. La salinisation augmente ainsi l'imperméabilité des couches profondes du sol, ce qui empêche l'aération et l'absorption d'eau nécessaire pour une bonne croissance des plantes (Ghassemi *et al.*, 1995). La présence de sels et l'élévation conséquente de la pression osmotique de la solution du sol, entraînent la formation de paysages particuliers, soit occupés par une végétation naturelle spécialisée dite halophyte, soit présentant une absence totale de végétation (*tannes*), selon le degré de salinité atteint (Loyer, 1991).

- Le complexe adsorbant

La salinité agit sur le complexe adsorbant par les cations échangeable (Na^+ et Mg^{2+}) ce qui provoque le lessivage des bases, la destruction des ponts calciques et avec comme conséquence une forte vitesse d'infiltration des eaux. La saturation du complexe adsorbant en Na^+ provoque la dispersion des argiles (fraction fine) diminuant ainsi la porosité (aération) et la capacité de rétention de l'eau (Fig. 2).

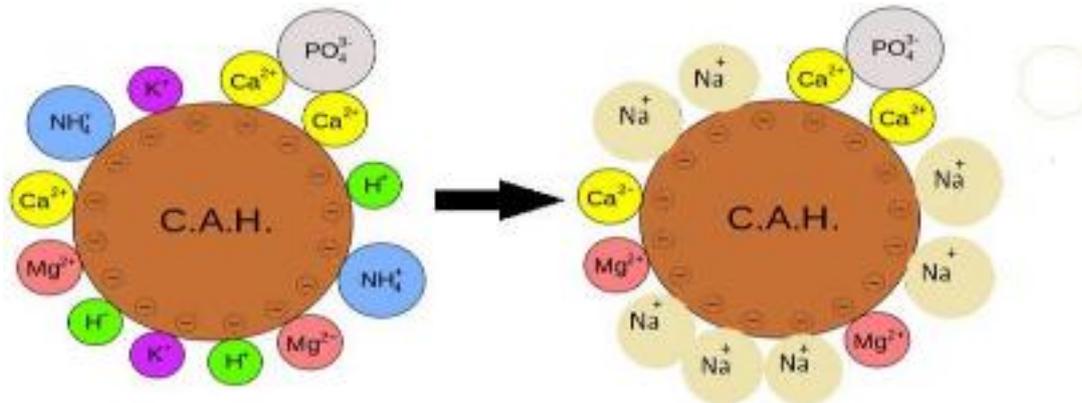


Figure 2: Effet du sodium sur le complexe adsorbant

I.4. Effets de la salinité sur les végétaux

Le stress salin exerce à la fois des déséquilibres osmotiques, ioniques et nutritionnels. Cependant, l'effet physiologique exact du stress salin sur la plante est encore inconnu (Brun, 1980). Les fortes concentrations en sels dissouts dans la solution du sol ont des effets délétères sur les végétaux. Cependant, certaines espèces végétales dites halophytes sont adaptées à ces conditions grâce à différents mécanismes physiologiques. Elles se développent à des teneurs de sels supérieures à 300 mM. Par contre, les espèces dites glycophytes sont sensibles au sel, leur croissance est fortement inhibée avec des concentrations de sel entre 100 mM et 200 mM (Zhu, 2007). Les effets négatifs de la salinité sur les végétaux peuvent entraîner trois types de stress (hydrique, ionique e nutritionnel).

- Le stress hydrique

D'une manière générale, l'alimentation en eau du végétal dépend de la différence de potentiel hydrique entre la solution du sol et le suc cellulaire de la plante. La présence de sels à forte concentration dans la solution du sol augmente sa pression osmotique qui devient alors supérieure à celle du suc cellulaire, d'où l'impossibilité pour les racines d'absorber l'eau nécessaire à la croissance de la plante (Brun, 1980). Cela nécessite un ajustement osmotique adapté afin que le potentiel hydrique cellulaire demeure inférieur à celui du milieu extracellulaire. Lorsque l'ajustement osmotique n'est pas suffisant, l'eau a tendance à quitter les cellules ; ce qui provoque un déficit hydrique et une perte de turgescence des cellules (Levigneron *et al.*, 1995 ; Munns, 2009).

- Le stress ionique (toxicité)

La toxicité ionique survient lorsque l'accumulation de sels dans les tissus perturbe des activités métaboliques de la plante comme l'absorption d'eau et de nutriments, l'ajustement osmotique, la synthèse de protéines et d'acides nucléiques, l'accumulation de solutés organiques, la respiration et la photosynthèse (Levigneron *et al.*, 1995).

- Le stress nutritionnel

Des concentrations salines élevées dans le milieu provoquent une altération de la nutrition minérale de la plante. L'accumulation des ions de Na^+ dans le sol limite l'absorption de cations indispensables tels que K^+ et Ca^{2+} . Il y aurait une compétition entre ces ions et le sodium pour les mêmes sites de fixation apoplasmiques. La présence des ions Cl^- inhibe l'absorption des nitrates (NO_3^-). Ce déséquilibre nutritionnel est une des causes de la réduction de croissance en présence du sel lorsque des ions essentiels comme K^+ , Ca^{2+} ou NO_3^- deviennent limitant (Levigneron *et al.*, 1995 ; Zhu, 2007).

II. Mécanismes d'adaptation des plantes au stress salin

L'adaptation des plantes au stress salin consiste en leur capacité à maintenir leur croissance et leur rendement dans des environnements salés (Ashraf, 1994). La notion d'adaptation est liée à celles de résistance et de tolérance aux stress. C'est un phénomène complexe qui implique des particularités morphologiques, des mécanismes physiologiques, biochimiques et moléculaires variés (Greenway et Munns, 1980). Ces mécanismes interviennent à différents niveaux ; de la cellule à l'organisme entier. Les végétaux sont ainsi classés en deux grands groupes suivant leur comportement vis-à-vis du sel : les glycophytes et les halophytes.

- Les **glycophytes** : elles poussent en milieu non salé et réagissent défavorablement à un excès de sel dans le milieu de croissance.

- Les **halophytes** : elles supportent des concentrations plus ou moins élevées de sel. Elles sont subdivisées en halophytes vraies et en halophytes facultatives. Les halophytes vraies sont les végétaux dont la croissance est stimulée par la présence de sel et ne se développent qu'en présence de NaCl. Elles supportent de fortes concentrations de sel (ex. *Atriplex* sp., *Salicornia* sp., *Cakile maritima* *Sueda* sp,...). Parmi ces halophytes, on distingue les régulateurs et les accumulateurs de sel. Les régulateurs de sels excrètent le sel par des glandes foliaires spécialisées alors que les accumulateurs de sels stockent les ions en excès dans leur vacuole, et maintiennent la turgescence du cytoplasme et/ou dans les vieilles feuilles pour

préservent les jeunes feuilles (plantes grasses ou succulentes comme les espèces du genre *Salicornia*,...). Les halophytes facultatives présentent une légère augmentation de leur croissance à des teneurs faibles en sels et peuvent se développer aussi bien en présence qu'en absence de sel (ex. *Plantago maritima*, *Aster tripolium*). En réponse au stress salin, les plantes développent trois stratégies de tolérance au sel : l'ajustement osmotique, l'exclusion et l'inclusion.

II.1. L'ajustement osmotique

Il est lié au stress osmotique (Yeo, 1983 ; Cheeseman, 2014). Il permet le maintien de l'alimentation hydrique et la pression de turgescence (Niu *et al.*, 1995 ; Bohner et Shem, 1999). Il consiste en une modification des concentrations des solutés compatibles dans les tissus de façon à maintenir une concentration ionique plus élevée (hypertonique) dans le milieu intracellulaire que dans le milieu extérieur (Hasegawa *et al.*, 2000). Ces solutés compatibles ont une fonction osmoprotectrice et/ou osmorégulatrice. On peut citer des éléments minéraux (K^+ , Ca^{2+} ,...), des composés organiques tels les sucres solubles (fructose, glucose, tréhalose, raffinose,...) et certains amino-acides (proline, glycine bêtaïne,...). La proline représente la principale substance accumulée en réponse aux stress hydrique et salin. L'accumulation de la proline, induite par les stress, peut être le résultat de trois processus complémentaires: stimulation de sa synthèse, inhibition de son oxydation et/ou altération de la biosynthèse des protéines. Le K^+ , outre son importance sur l'ouverture des stomates, est un osmorégulateur dont le ratio K^+/Na^+ témoigne de la tolérance des plantes au stress salin. En effet, un ratio K^+/Na^+ supérieur à 1 est un bon indicateur de tolérance pour sélectionner des plantes adaptées au stress salin (Siva *et al.*, 2015). En plus de l'ajustement osmotique, ces solutés compatibles jouent un rôle très important dans l'intégrité des membranes (plasmiques, thylakoïdes,...) (Rhodes et Hanson, 1993). Ils ont également une fonction de stabilisation de la conformation des protéines et des propriétés d'antioxydants.

II.2. L'exclusion des ions Na^+

L'exclusion des ions toxiques en particulier le Na^+ de la cellule par un mécanisme d'efflux, est une importante stratégie de tolérance au sel (Khan et Marshall, 1981). Les plantes *excluser* sont généralement sensibles à la salinité et sont incapables de contrôler le niveau de Na^+ cytoplasmique. Ces ions sont transportés vers les feuilles par le xylème sous l'effet du courant

de la transpiration, puis en partie re-circulés vers les racines par le phloème. Ces espèces sensibles à la salinité, contiennent ainsi peu d'ions Na^+ dans les feuilles et un excès dans les racines. Chez les glycophytes, l'exclusion d'ions est la seule stratégie de tolérance au sel (Gorham *et al.*, 1985).

II.3. L'inclusion et la compartimentation des ions Na^+

La compartimentation des ions entre les organes (racines/feuilles), les tissus (épiderme/mésophylle), ou encore entre les compartiments cellulaires (vacuole/cytoplasme) est le mécanisme le plus fréquent d'adaptation à la salinité (Ouerghi *et al.*, 1998). L'inclusion et la compartimentation vacuolaire des ions nocifs permettent de préserver le cytoplasme (lieu de la plupart des processus métaboliques) de la toxicité des ions Na^+ et Cl^- d'une part et de réaliser l'ajustement osmotique d'autre part (Kohl, 1997).

La vacuole est le compartiment cellulaire le plus volumineux et permet un stockage massif de Na^+ sans dommage pour le fonctionnement du reste de la cellule. Lorsque la capacité d'accumulation (vitesse et/ou quantité) de la vacuole est saturée, les ions Na^+ qui continuent à parvenir aux parties aériennes s'accumulent soit dans le cytoplasme, soit dans les parois cellulaires (Munns, 1993). Ces deux compartiments de faible volume sont rapidement saturés. La saturation des parois par un excès d'ions provoque un déséquilibre hydrique qui se traduit par une perte brutale en eau des cellules qui se déshydratent et meurent. La saturation du cytoplasme inhibe le métabolisme ce qui ralentit la croissance et provoque aussi la mort des cellules. Le stockage dans la vacuole apparaît donc comme le seul véritable recours des cellules par le sel et la stratégie la plus efficace pour éviter la toxicité de Na^+ sur des sites métaboliques dans le cytoplasme. L'accumulation de Na^+ dans la vacuole réduit également la teneur de Na^+ dans le xylème et par conséquent minimise les effets du stress osmotique. L'influx de Na^+ dans la vacuole se fait par le biais des échangeurs vacuolaires Na^+/H^+ et le gradient de H^+ généré par des protéines H^+ -ATPase et H^+ -PPase (pyrophosphatase) (Blumwald *et al.*, 2000). Des études ont montré que l'activité des échangeurs vacuolaires Na^+/H^+ dans les racines augmente lors de l'ajout de Na^+ dans le milieu (Wilson et Shannon, 1995 ; Ballesteros *et al.*, 1997). En outre, l'augmentation de l'activité de l'échangeur vacuolaire Na^+/H^+ dans les racines durant le stress salin est plus importante chez l'espèce tolérante *Plantago maritima* que chez l'espèce sensible *P. media* (Staal *et al.*, 1991). Ces résultats révèlent donc une implication de ce type d'échangeur dans l'adaptation des plantes à la salinité.

Plusieurs gènes sont impliqués dans le transport des Na^+ (ENA, SOS1, NHX,...) chez les plantes. Les NHX1 codent pour un antiporteur situé sur le tonoplaste qui permet de séquestrer le sodium dans la vacuole (Apse *et al.*, 1999). Des études ont montré une surexpression du gène NHX1 en conditions salines plusieurs espèces et leurs confère une adaptation. Chez *Arabidopsis*, parmi six gènes codant des échangeurs vacuolaires Na^+/H^+ , AtNHX1, AtNHX2 et AtNHX5 sont induits dans les conditions de stress salin (Yokoi *et al.*, 2002). De plus, il a été montré que la surexpression du gène AtNHX1, améliore le stockage de Na^+ dans la vacuole et augmente fortement la tolérance à la salinité chez *Arabidopsis* (Apse *et al.*, 1999), la tomate (Zhang et Blumwald, 2001) et *Brassica napus* (Zhang *et al.*, 2001).

III. Méthodes de restauration et/ou de valorisation des terres salées au Sénégal

Au Sénégal, beaucoup d'efforts sont déployés pour lutter contre la salinisation des terres mais aussi pour la restauration et la valorisation des terres salées. Les techniques utilisées portent principalement sur les méthodes mécaniques ou physiques, chimiques, agronomiques et biologiques.

III.1. Les méthodes mécaniques ou physiques

Elles consistent à construire des barrages, des digues et diguettes anti-sels et de drains. De nombreux petits barrages dotés d'ouvrages évacuateurs ont été réalisés dans différentes vallées de la Casamance avec le Projet d'Aménagement du Barrage d'Affiniam; le Projet Intermédiaire puis Intégré de Développement Agricole de la Basse Casamance (PIDAC) ; le Projet de Développement Rural de la Basse Casamance (DERBAC), qui a prit le relais du PIDAC, le Projet pour la Gestion de l'Eau dans la zone Sud (PROGES), le Projet d'Appui à la Petite irrigation Locale (PAPIL) et le Projet d'Appui au Développement Rural en Casamance (PADERCA)... Il est à noter que beaucoup d'ouvrages avaient déjà été construits dans le passé mais leur gestion et leur entretien n'avaient toujours pas été pleinement assurés, ce qui n'a pas favorisé leur fonctionnement adéquat et durable.

- Les barrages

Les terres protégées par des barrages anti-sel sont lessivées par les eaux de ruissellement qui sont contrôlées au besoin par de petits ouvrages de régulation. Ces ouvrages hydro-agricoles ont surtout concerné la Casamance et le Sine-Saloum où l'Etat, à travers plusieurs projets, a réalisé des endiguements dans les vallées pour empêcher l'intrusion des eaux marines.



Planche photographique 1 : Illustration de quelques méthodes physiques de restauration des sols salés (M. Diatta)

- Les digues et diguettes

Les diguettes sont des ouvrages manuels de 50 cm de hauteur et de 01 m de largeur à la base. Elles sont installées sur les lignes de démarcation entre les *tannes* vives enherbées et suivant les courbes de niveau. Dans le but de fixer les diguettes, leur végétalisation est nécessaire. *Sporobulus robustus* (Niamboul), une herbe halophyle vivace et présentant des stolons, est utilisée.

- L'Oukine

C'est un système d'aménagement hydro-agricole sous un régime pluviométrique d'au moins 600 mm. Il consiste à confectionner des billons à l'intérieur des cuvettes avec une voie d'entrée d'eau de ruissellement en amont et une autre de sortie en aval, ce qui permet d'évacuer l'eau chargée de sel et de piéger l'eau de ruissellement.

III.2. Les méthodes agronomiques

Elles visent à augmenter le potentiel organique du sol en vue de réduire l'évaporation et d'améliorer sa fertilité. Elles consistent à mettre des ordures ménagères et toute matière organique biodégradable sur la surface des terres salées. La biodégradation de ces produits

entraînera à terme une amélioration de la structure du sol. Un labour superficiel est effectué en début de saison sèche afin d'amender le sol. L'enfouissement de la matière organique permet, d'une part un recyclage des nutriments contenus dans la biomasse et d'autre part, le maintien d'un certain niveau de carbone organique dans le sol. Cette méthode constitue par conséquent une filière courte pour restituer au sol la totalité de la biomasse et les nutriments qui la composent (K, Ca, Mg, C,...). Avec l'activité biologique, la structure du sol s'améliore et son aspect chimique devient plus favorable à l'évolution de la microfaune du sol et le processus pourra à terme favoriser l'installation des cultures agricoles.



Planche photographique 2 : Quelques matières organiques utilisées pour la restauration des sols salés (D. Fall)

Toutefois, pour restaurer les sols salés, il importe d'utiliser des techniques qui favorisent le lessivage des sels tel que le remplacement de l'ion sodium (Na^+) par un autre cation (le calcium) qui modère le milieu. Des études ont révélé que la coque d'arachide est riche en ions calcium. A une dose de 2 à 4 tonnes/ha sur sol argileux et de 8 à 10 tonnes/ha sur sol sableux, la coque d'arachide peut contribuer de façon efficiente à la réorganisation de la structure du sol et à l'amélioration de sa fertilité. Des résultats obtenus par le PROGERT (2006, 2007, 2008) ont montré que l'utilisation de la coque d'arachide permet d'augmenter les rendements du mil et du maïs cultivés sur sol salé. En 2008, une production moyenne de 600 kg/ha a été obtenue dans la parcelle de maïs amendée avec coques d'arachide contre 270 kg/ha dans la parcelle témoin soit une augmentation de 122% en 3 ans.

III.3. Les méthodes chimiques

Les actions chimiques concernent l'utilisation du phosphogypse ou le chaulage. L'apport du phosphogypse, riche en calcium, permet le remplacement des ions sodium par le calcium dans le complexe du sol. Il s'ensuit une libération de ces ions sodium qui seront évacués par le

lessivage des sols. Cependant, cette technique nécessite de gros moyens techniques et reste onéreuse du fait des importantes quantités de phosphogypse nécessaires. En effet, il faut 1 à 4 tonnes de phosphogypse pour traiter 1 ha de sol (Mutsaers et Van Der Velden, 1973). Il apparaît également que le phosphogypse contient des métaux lourds à faible concentration. Il s'agit surtout du plomb, du cadmium et du chrome. Or, ces métaux peuvent être toxiques pour les plantes, même à faible concentration (Ndiaye, 1999). Le chaulage des sols est une technique agricole qui consiste à apporter des amendements calciques ou calco-magnésiens à un sol pour en corriger l'acidité.

III.4. Les méthodes biologiques

Elles consistent à reboiser avec des espèces tolérantes à la salinité dans le but de restaurer les terres salées. L'objectif de ces reboisements est de valoriser ces terres marginales pour la production de bois de feu et de contribuer ainsi à la satisfaction de la demande d'une population en pleine croissance. Les recherches sylvicoles sur les sols salés du Sine-Saloum ont été entreprises en 1967 par l'ISRA/CNRF dans la région de Kaolack (Kabatoki, Koutal et Keur Mactar) en vue d'une part de l'utilisation rationnelle des terres salées à vocation sylvopastorale et d'autre part l'aménagement du paysage rural de cette région en réintroduisant l'arbre dans les préoccupations des paysans (Giffard, 1972). Les recherches ont été orientées principalement vers la sélection d'essences forestières susceptibles de se développer sur des sols qui se caractérisent par un caractère halomorphe très marqué (présence de salontohaks), un caractère hydromorphe (sols inondés trois mois dans l'année). Il s'agissait entre autres des espèces tolérantes au sel comme le Tamaris (*Tamarix* spp.), l'Eucalyptus (*Eucalyptus* spp.) et le Niaouli (*Melaleuca* spp.).



Planche photographique 3 : Parcelle reboisée avec *Tamarix aphylla* à Ndiaffate (Rég. Kaolack) (M. Diatta)

Les dix premières années de croissance ont suscité beaucoup d'espoir car les essences utilisées semblaient s'adapter au milieu. Mais la forte mortalité apparue par la suite a très fortement minimisé les chances de récupération des sols et pose le problème de la connaissance préalable du niveau de salinité du milieu d'introduction et du seuil de tolérance des essences utilisées.

IV. Rôles des amendements organiques dans la restauration des sols salés

La faible productivité des sols salés est souvent attribuée à la teneur élevée en ions toxiques (Na^+ , Cl^- ,...) et les dommages causés par ces ions solubles. Toutefois, il est important de noter que les sols salés sont généralement très pauvres en matières organiques et donc peu fertiles (Liang *et al.*, 2003). Ainsi, l'apport de matières organiques pourrait contribuer à l'amélioration des propriétés (biologiques, chimiques et physiques) des sols sales et donc à la restauration de leur fertilité. Le tableau 2 montre les effets de l'apport de quelques matières organiques sur les caractéristiques des sols salés.

IV.1. Effet de l'amendement organique sur les propriétés biologiques des sols

Les propriétés biologiques du sol sont très sensibles mêmes aux petits changements qui se produisent dans les pratiques de gestion. Par conséquent, il est possible de les utiliser pour évaluer les effets de l'application de la matière organique sur les caractéristiques des sols salés (Diacono et Montemurro, 2010). Les applications de matières organiques exogènes peuvent améliorer les fonctions biologiques du sol. En effet, Liang *et al.* (2003) ont montré que l'activité de l'uréase, de la phosphatase alcaline et le taux de respiration du sol ont été considérablement stimulés par l'incorporation du fumier organique. Des études ont montré que l'effet positif des amendements organiques dépend de la nature de la matière organique. En effet, la combinaison paille de riz et le fumier de porc a un effet plus important sur les activités enzymatiques et microbiennes que leurs applications individuelles sur les sols salés (Liang *et al.*, 2005). Ce résultat confirme que l'incorporation de fumure organique peut être un agro-technologie efficace à faible intrant pour réduire au minimum la induite par la salinisation. En outre, il a été démontré que l'application de fumier composté et non composté à un sol salé dans des conditions sèches peut réduire de 50% le sodium échangeable et augmenter significativement plusieurs activités enzymatiques (uréase, phosphatase alcaline, déshydrogénase,...) (Tejada *et al.*, 2006).

Tableau 2 : Effets de quelques apports de matières organiques sur les propriétés des sols salés

Matières organiques	Niveaux de Salinité	Effets	Références
Compost de coton + fumier de volaille	PSE 15,7 CE 9 mS/cm pH 8	- Amélioration de la structure du sol - Réduction de 50% du pourcentage de sodium échangeable - Augmentation des activités enzymatiques	Tejada <i>et al.</i> , 2006
Mélange de vert compost de déchets, carex la tourbe et résidus furfural	PSE 15,8 CE 3,69 mS/cm pH 7,75	- Diminution de la densité apparente, de la conductivité électrique, du pourcentage de sodium échangeable - Augmentation de la porosité et du carbone organique	Wang <i>et al.</i> , 2014
Fumier de porc + Paille de riz	Sels totaux 3,3 g/Kg pH 8,86	- Augmentation de plus de 150% de l'activité de l'uréase - Augmentation significative de la phosphatase alcaline et du taux de respiration du sol	Liang <i>et al.</i> , 2003
Engrais verts + fumier	1%- 2% de sels CE 8,5-20,4 mS.cm-1 pH 4,5 ; 8-4,79	- Baisse de la salinité des sols, - Amélioration du rendement	Cha-um et Kirdmanee, 2011
Compost de déchets industriels de manioc + lombricompost avec ou sans les vers de terre	CE 4,26 mS.cm-1 pH 7,30	-Baisse de la conductivité électrique, - Augmentation de la CEC, carbone organique, azote total et le phosphore assimilable	Oo <i>et al.</i> , 2013
Compost de sous-produits de l'huile d'olive et fumier de volaille	CE 1,85 mS.cm-1 pH 7,7	- Augmentation du potassium soluble et échangeable (et donc limiter l'entrée de Na + dans l'échange complexe) - Augmentation de la CCE	Walker et Bernal, 2008
Fumier + eau salée (CE 2,25 mS.cm-1)	CE 4,8-6,3 mS.cm-1	- Amélioration du taux d'infiltration d'environ 89%, - Diminution de la sodicité du sol de 41,3%. - Réduction de la densité apparente du sol (amélioration de la la porosité et l'aération du sol) - Amélioration du lessivage de la solution saline	Kahlow et Azam, 2003
Compost de déchets d'origine animale résidus de végétaux)	PSE 34-37 CE 4,03-5,11 mS.cm-1 pH 8,62-8,75	- Diminution des rapports de la CE et d'adsorption de sodium - Réduction du pH du sol, de la salinité et de la sodicité du sol	Mahdy, 2011
Eaux usées municipales	CE 60 mS.cm-1 pH 7,48	-Diminution du pH et la densité apparente du sol -Augmentation de la CE et de la teneur en matières organiques	Mojiri, 2011
Gypse + Acide sulfurique + Fumier de ferme	CE 3,7 – 5,0 mS.cm-1 pH 8,69-9,18	-Diminution de la densité apparente -Augmentation de la porosité, de la perméabilité à l'eau et de la conductivité hydraulique	Hussain <i>et al.</i> , 2011

Cet apport peut également constituer un tampon pour le pH du sol en présence de sels ; ce qui va influencer l'activité des microorganismes (Lakhdar *et al.*, 2009). Rao et Pathak (1996) ont constaté que la matière organique (engrais vert) améliore l'activité microbienne des sols d'une $CE \leq 26$, montrant une augmentation de l'activité uréasique des sols salins et alcalins.

IV.2. Effet de l'amendement organique sur les propriétés chimiques des sols

Hu et Schmidhalter (2005) ont montré que la disponibilité et l'absorption du phosphore (P) sont réduites en condition de stress salin. Dans les sols salés, la fraction de potassium (K) disponible peut augmenter par le biais de l'augmentation de la CEC liée à la teneur en matière organique. L'application de fumier de volaille et du compost peut augmenter à la fois la CEC et le potassium (K^+) soluble et échangeable, qui est un concurrent du Na^+ dans les sols sodiques, limitant ainsi l'entrée de ce dernier dans le complexe échangeable (Walker et Bernal, 2008). Wang *et al.* (2014) ont montré qu'un mélange de compost de déchets verts, de tourbe de carex et de résidus furfural (1: 1: 1) réduit de manière significative les teneurs en Na^+ et augmente la CEC et la disponibilité des éléments nutritifs tels que l'azote, le phosphore et le potassium (Wang *et al.*, 2014). Par ailleurs, une bonne sélection de la matière organique comme sources d'éléments nutritifs, la date, ainsi que la méthode d'application s'avèrent nécessaires pour une amélioration des propriétés chimiques des sols salés (Diacono et Montemurro, 2010). Des études ont montré que l'application de l'humus augmente l'absorption d'azote, alors que l'apport de feuilles améliore l'absorption d'autres macro- et micro-nutriments (Khaled et Fawy, 2011).

IV.3. Effet de l'amendement organique sur les propriétés physiques des sols

La matière organique favorise la stabilité des agrégats du sol à travers les propriétés de liaison ou d'adhésion, à la fois des exsudats de bactéries (polysaccharides) et de champignons (Diacono et Montemurro, 2010). La stabilité des agrégats peut également être obtenue par une réduction de la teneur en sodium du sol. En effet, le Ca^{2+} contenu dans la matière organique pourrait diminuer la proportion de Na^+ dans le complexe d'échange cationique et renforcer la lixiviation du Na^+ échangeable (Qadir et Oster, 2004). Cette situation favorise la floculation des éléments argileux et donc réduit l'érosion des sols. Des études effectuées par Oo *et al.* (2013) ont montré que l'amendement organique augmente la floculation, le nombre et la stabilité des agrégats du sol. En conséquence de la stabilité des agrégats, la porosité du sol, l'infiltration de l'eau, et la capacité de rétention d'eau sol sont améliorées, minimisant ainsi

l'effet du déficit hydrique. L'apport de phosphogypse, de fumier ou leur combinaison réduit significativement le taux d'adsorption du sodium (Hussain *et al.*, 2001). Par ailleurs, une autre étude a montré que les propriétés physiques du sol, tels que le taux d'infiltration de l'eau, la capacité de rétention, ont été considérablement améliorées par l'application des déchets ménagers (Lax *et al.*, 1994). Une corrélation directe entre les ajouts de matière organique et la diminution de la densité apparente du sol était aussi communément observée. Cette diminution peut contribuer à l'amélioration de la porosité du sol et, par conséquent, l'amélioration du lessivage de l'eau saline (Tejada *et al.*, 2006 ; Kahlown et Azam, 2003). Des études effectuées par Wang *et al.* (2014) ont montré qu'un mélange de déchets organiques entraîne une diminution de 11%, 87% et 71% respectivement de la densité apparente, de la conductivité électrique et du pourcentage de sodium échangeable et augmente de 25% et 96% respectivement de la porosité totale et du carbone organique par rapport au témoin. Ces résultats suggèrent l'efficacité de combinaison de différentes matières organiques pour la récupération des terres salées.

V. Rôles des symbioses microbiennes dans l'amélioration de la tolérance des plantes à la salinité

V.1. Généralités sur les symbioses microbiennes végétales

Une symbiose est définie comme étant une association à bénéfice réciproque entre deux êtres vivants. Il existe en gros trois symbioses microbiennes végétales : les deux symbioses bactériennes (rhizobienne et actinorhizienne) et la symbiose mycorhizienne.

V.1.1. La symbiose rhizobienne

Le terme «rhizobium » ou « rhizobia » au pluriel est un terme générique qui désigne les bactéries fixatrices d'azote qui forment des nodules racinaires ou aériens sur les légumineuses avec une exception du genre *Parasponia* de la famille des *Ulmaceae* (Allen et Allen, 1981). Dans cette association, la plante fournit à la bactérie les produits de la photosynthèse et reçoit en retour de l'azote. La fixation biologique de l'azote atmosphérique par voie symbiotique représente une source renouvelable d'azote pour les systèmes agroforestiers. En effet, environ 200 à 300 kg de N/ hectares/an sont fixés par voie symbiotique (Peoples *et al.*, 1995).

Les rhizobia sont des bactéries Gram-, aérobiques et non sporulantes. Leur classification a subi de nombreux remaniements ces dernières années. A ce jour, sur la base des données

génomiques et notamment des séquences d'ADN ribosomal 16S, les symbiotes des légumineuses comprend 98 espèces réparties dans 13 genres dont la plupart appartiennent au groupe des alpha-protéobactéries et des beta-protéobactéries (Voir Weir, B.S. (2016) The current taxonomy of rhizobia. NZ Rhizobia website. <https://www.rhizobia.co.nz/taxonomy/rhizobia> Last updated: Jan, 2016). Toutes les α -protéobactéries appartiennent à l'ordre des Rhizobiales, tandis que les β -protéobactéries appartiennent à l'ordre des Burkholderiales. Les α -proteobacteries sont constituées des genres *Rhizobium* (Franck, 1889), *Ensifer* (Chen *et al.*, 1988 ; de Lajudie *et al.*, 1994 ; Young, 2003), *Mesorhizobium* (Jarvis *et al.*, 1997), *Bradyrhizobium* (Jordan, 1982), *Azorhizobium* (Dreyfus *et al.*, 1988), *Methylobacterium* (Sy *et al.*, 2001 ; Jourand *et al.*, 2004), *Phyllobacterium* (Valverde *et al.*, 2005), *Ochrobactrum* (Trujillo *et al.*, 2005 ; Zurdo-Pineirro *et al.*, 2007), *Devosia* (Rivas *et al.*, 2002), *Shinella* (Lin *et al.*, 2008), et *Aminobacter* (Maynaud *et al.*, 2012). Les β -proteobacteries sont composées de : *Burkholderia* (Moulin *et al.*, 2001) et *Cupriavidus* (anciennement *Ralstonia*) (Chen *et al.*, 2003; Vandamme et Coenye, 2004).

La famille des légumineuses comprend conventionnellement trois sous-familles : *Caesalpinaceae*, *Mimosaceae*, et *Fabaceae* et compte 16000 à 19000 espèces réparties dans 750 genres (de Faria *et al.*, 1989). Ces légumineuses, capables de s'associer aux bactéries fixatrices d'azote, comportent des espèces ligneuses (acacias, néré,...) et herbacées (haricot, arachide, pois, niébé,...). Elles présentent une importance économique majeure : ressource en fourrage, bois, aliment, propriétés médicinales, rôle écologique important en particulier pour la stabilisation et la fertilisation des sols. Notons que la double nodulation des tiges et des racines n'est rencontrée que chez quelques légumineuses tropicales qui appartiennent aux genres *Neptunia*, *Sesbania* (Dreyfus et Dommergues, 1981), *Aeschynomene* (Alazard et Becker, 1985) et *Discolobium* (Loureiro *et al.*, 1994).

V.1. 2. La symbiose actinorhizienne

Ce sont des associations entre les plantes actinorhiziennes et les bactéries du sol du genre *Frankia*. Ces interactions symbiotiques s'établissent en situation de carence azotée et elles conduisent à la formation de nouveaux organes racinaires, les nodules actinorhiziens, dénommés aussi actinorhizes, où les bactéries sont hébergées et fixent l'azote atmosphérique (Duhoux *et al.*, 1996). Les *Frankia* sont des bactéries diazotrophes, immobiles, Gram⁺, aérobies ou microaérophiles et hétérotrophes (Lechevalier, 1994). *Frankia* se présente aussi bien dans le sol et dans les nodules sous forme de filaments ramifiés et septés appelés hyphes.

Ces derniers pouvant comporter des vésicules, sites de fixation du diazote et parfois des sporanges (Burleigh et Torrey, 1990 ; Chaia *et al.*, 2010). En raison de ses caractéristiques morphologiques, biochimiques et génétiques, *Frankia* est classé dans l'ordre des Actinomycétales, la famille des *Frankiaceae* avec le seul genre *Frankia* (Lechevalier, 1994). Les plantes actinorhiziennes désignent toutes les plantes vivant en symbiose avec l'actinomycète *Frankia* (Baker et Mullin, 1992). Elles n'appartiennent pas à la super famille des Légumineuses. Du point de vue morphologique, elles constituent un groupe de plantes pérennes ligneuses à l'exception du genre *Datisca*. Les plantes actinorhiziennes sont également des espèces édificatrices capables d'apporter dans le sol où elles poussent des quantités considérables de litière riche en azote et composés azotés hydrosolubles (Domenach *et al.*, 1994). Elles représentent donc, après les Légumineuses, le deuxième groupe de plantes capables de fixer biologiquement l'azote atmosphérique et présentent un taux de fixation du diazote équivalent à celui des Légumineuses allant jusqu'à 300 kg N₂/ha/an (Wall, 2000). Elles constituent un groupe disparate composé de 260 espèces réparties en 24 genres et 8 familles d'angiospermes. Ces familles comprennent les : *Betulaceae*, *Casuarinaceae*, *Coriariaceae*, *Datiscaceae*, *Elaeagnaceae*, *Myricaceae*, *Rhamnaceae* et *Rosaceae* (Moiroud, 1996).

V.1.3. La symbiose mycorhizienne

Le terme « mycorhize » a été créé par le phytopathologiste allemand Frank en 1885. La mycorhize, du grec «*mukês*» qui signifie champignon et «*rhiza*» pour racine, est l'association symbiotique qui s'établit entre les racines d'une plante et les champignons du sol appartenant au règne fongique. Dans cette association, la plante fournit au champignon les produits de la photosynthèse et en retour reçoit du champignon des sels minéraux (P, N,...) et de l'eau (Solaimanand et Saito, 1997; Bago *et al.*, 2003). Il est important de noter qu'environ 80% des plantes terrestres sont mycorhizées et la non mycorhization est l'exception. Effet, seules quelques espèces des familles de Chenopodiacées, de Caryophyllacées, de Brassicacées, de Urticacées, de Joncacées et de Cypéracées ne forment pas de mycorhizes. Il existe sept types de symbioses mycorhiziennes (mycorhizes à arbuscules, mycorhizes arbutoïdes, mycorhizes à pelotons des Orchidacées, mycorhizes monotropoïdes, mycorhizes éricoïdes, ectomycorhizes et ectendomycorhizes) dont les plus importantes sont les mycorhizes à arbuscules (MA) et les ectomycorhizes (Fortin *et al.*, 2008 ; Smith et Read, 2008).

V.2. Effet de l'inoculation microbienne sur la tolérance des plantes à la salinité

V.2.1. L'inoculation rhizobienne

Dans les sols salés, les fortes concentrations de Na^+ inhibent l'absorption de l'ammonium (NH_4^+) et réduit par conséquent la nutrition azotée de la plante. Ainsi, une autre source d'azote telle que la symbiose rhizobienne, permettrait à la plante de maintenir sa croissance en milieu salé. L'effet positif de l'association symbiotique avec des rhizobia sur l'adaptation des légumineuses aux stress environnementaux tel que la salinité a largement été décrit (Diouf *et al.*, 2005; Thrall *et al.*, 2005; Fall *et al.*, 2009 ; Coba de la Peña et Pueyo, 2011). Ces auteurs ont montré un effet positif de l'inoculation rhizobienne sur la croissance des plantes en condition salines. L'amélioration de la tolérance à la salinité chez les légumineuses est accompagnée par une augmentation des niveaux de proline, une diminution des pertes d'électrolytes et par le maintien de la teneur en eau des feuilles (Bano et Fatima, 2009). Certains micro-organismes produisent des hormones végétales, tels que l'acide indole acétique et l'acide gibbérellique, qui induisent une croissance plus importante des racines et qui conduit à l'absorption accrue de nutriments (Egamberdieva et Kucharova, 2009). Chez la majorité des rhizobiacées, comme *Ensifer meliloti*, la glycine bétaine est une molécule osmoprotectrice majeure, dont l'accumulation est fortement stimulée lors d'un stress osmotique (Boscari *et al.*, 2002; Mandon *et al.*, 2003 ; Boscari *et al.*, 2004).

V.2.2. L'inoculation avec les Frankia

A l'image de l'inoculation rhizobienne, des études ont montré que l'inoculation avec des *Frankia* améliore la tolérance au stress salin des plantes actinorhiziennes (Reddell *et al.*, 1986 ; Oliveira *et al.*, 2005, Diagne *et al.*, 2013a). Des plantes de *Casuarina equisetifolia* inoculées avec des broyats de nodules de *Frankia* avaient une meilleure croissance que les témoins en condition saline (Ng, 1987 ; Diagne *et al.*, 2013a, Ngom *et al.*, 2016). L'inoculation avec des souches de *Frankia* des plantes de *Alnus glutinosa*, en présence d'une conductivité électrique de 5980 $\mu\text{S}/\text{cm}$, a amélioré significativement la croissance comparés aux témoins non inoculés (Oliveira *et al.*, 2005).

V.2.3. L'inoculation mycorhizienne

Plusieurs travaux ont montré l'effet positif de l'inoculation avec des souches de champignons mycorhiziens à arbuscules (CMA) dans la tolérance des plantes hôtes à la salinité (Al-Karaki *et al.*, 2001; Cantrell et Linderman, 2001; Hajiboland *et al.*, 2010; Dodd et Ruiz-Lozano, 2012). Des études ont montré qu'en conditions salines, la mycorhization favorise la

croissance de certaines espèces végétales telles que le maïs, les acacias, le trèfle, la tomate, le concombre et la laitue (Ruiz-Lozano et Azcón, 1996 ; Al-Karaki *et al.*, 2001; Feng *et al.*, 2002; Diouf *et al.*, 2005). Cette amélioration de la tolérance au stress salin des plantes mycorhizées est généralement due à une meilleure nutrition hydrominérale des plantes. En effet, le mycélium extra-racinaire des CMA permet une augmentation de la capacité d'absorption des sels minéraux notamment le phosphate, l'azote, le cuivre, le fer et le zinc et de l'eau disponibles dans les sols (Al-Karaki, 2000). Ces sels minéraux sont par la suite transférés à la plante par les hyphes intra-racinaires et plus particulièrement par des structures très ramifiées appelées arbuscules. D'autre part, les CMA peuvent également réduire la concentration en Na^+ du sol. En effet, des études effectuées par Allen et Cunningham (1983) ont montré que les racines mycorhizées de *Distichlis spicata* accumulent plus de Na^+ que les racines non mycorhizées ; ce qui se traduit par une diminution de la teneur en Na^+ du substrat de culture. En outre, une augmentation du taux de sucres solubles a été observée dans les racines des plantes mycorhizées en condition de stress salin (Sheng *et al.*, 2011; Talaat et Shawky, 2011). Ces sucres totaux, sont des osmorégulateurs qui pourront jouer un rôle très important pour contrebalancer le stress osmotique induit par le sel (Feng *et al.*, 2002). Cette augmentation pourrait être due à une stimulation de l'activité photosynthétique.

V.2.3. La double inoculation (rhizobienne ou actinorhizienne + mycorhizienne)

Les associations symbiotiques sont bien connues pour améliorer la nutrition et la productivité des plantes notamment chez les légumineuses qui sont capables de développer simultanément des associations aussi bien avec les champignons mycorhiziens qu'avec les rhizobia ou les frankia (Azcón et Al-Atrash, 1997 ; Joner Erik et Johansen, 2000). La double inoculation avec les mycorhizes et les rhizobia ou les frankia augmente la tolérance des plantes à la salinité (Barea *et al.*, 1992 ; Sanchez-Diaz *et al.*, 1995 ; Ben Khaled, 2003 ; Diouf *et al.*, 2005, Diagne *et al.*, 2013b). Toutefois, l'efficacité de ces symbioses dépend en plus des conditions pédoclimatiques, des souches symbiotiques utilisées. Barea *et al.* (1992) ont montré qu'il y a une synergie entre les différents partenaires de l'association tripartite (mycorhizes-légumineuse-rhizobium), particulièrement dans les écosystèmes désertiques où le phosphore est peu disponible et constitue un facteur limitant pour la fixation symbiotique de l'azote. Requena *et al.* (1997) rapportent également que l'inoculation de *Anthyllis cytisoides* avec *Glomus intraradices* devient plus efficace lorsqu'elle est associée avec la souche de *Rhizobium* sp. NR4. Toutefois, la combinaison champignons mycorhiziens et rhizobia peut

conduire à un antagonisme et à une chute de la croissance comparativement aux plants inoculés séparément avec les microsymbiotes. Cette réduction de la croissance est généralement accompagnée d'une chute plus importante du taux de mycorhization, du nombre des nodosités et de la teneur foliaire en sucres solubles comparativement aux cas où les symbiotes ont été appliqués séparément. Cet antagonisme supposé entre les deux microsymbiotes serait le résultat d'éventuelles compétitions entre les champignons mycorhiziens et la bactérie fixatrice d'azote notamment vis-à-vis des hydrates de carbone solubles dans les racines de la plante hôte (Bethlenfalvay *et al.*, 1985 ; Warembourg *et al.*, 1982) et non pas à une compétition pour les sites d'infection (Smith et Bowen, 1979). La présence des deux symbiotes influence également les niveaux hormonaux (Barea et Azcón-Aguilar, 1983) et affecte l'ensemble de la productivité de la plante (Bethlenfalvay *et al.*, 1985) et par conséquent une variabilité de sa réponse. D'après Azcón *et al.* (1991), l'intensité des effets de l'interaction entre les microsymbiotes dépend largement de la combinaison champignon-bactérie.

VI. Caractères généraux des espèces étudiées

Notre étude a porté sur trois espèces forestières fixatrices d'azote atmosphérique à usages multiples (*Acacia senegal*, *A. seyal* et *Prosopis juliflora*). Ces espèces ont été choisies essentiellement sur la base de leur importance socio-économique en milieu rural (production de fourrage, de bois de chauffe ou de charbon, amélioration de la fertilité des sols, production de gomme arabique pour *A. senegal* et *A. seyal*). Il est important de noter qu'une récente étude de phylogénie moléculaire (séquence des marqueurs chloroplastiques) des espèces du genre *Acacia* en Afrique, a permis de différencier les espèces africaines par rapport aux espèces australiennes dans deux nouveaux genres : *Vachellia* (anciennement le sous-genre *Acacia*) et *Senegalia* (anciennement le sous-genre *Aculeiferum*) (Kyalangalilwa *et al.*, 2013). Dans notre étude, nous utiliserons les nouveaux noms.

VI.1. *Senegalia senegal* (L.) Britton, « Syn. *Acacia senegal* (L.) Willd »

- Systématique

S. senegal est un arbre de la famille des *Leguminosae*. Elle appartient à la sous famille des *Mimosoideae* qui est constituée de trois tribus : les *Acacieae* (1200 espèces tropicales et subtropicales) est le groupe le plus large ; les *Mimoseae* (400 à 500 espèces) et les *Ingeae* (350 à 400 espèces).

Classification classique :

Règne : *Plantae*
Sous-règne : *Tracheobionta*
Division : *Magnoliophyta*
Classe : *Magnoliopsida*
Sous-classe : *Rosidae*
Ordre : *Fabales*
Famille : *Leguminosae*
Sous-famille : *Mimosoideae*
Genre : *Senegalia*
Espèce : *senegal*

- Description botanique

S. senegal (Photo 5) est un arbre ou arbuste épineux de 6 à 12 m de haut, à cime étalée et ouverte, à branches très ramifiées et ascendantes (Arbonnier, 2002).



Planche photographique 5: Arbre adulte de *S. senegal* (D. FALL, 2006)

- Ecologie

C'est une espèce typique du Sahel. Elle est caractéristique des zones sèches situées au Sud du Sahara, depuis les côtes mauritaniennes et sénégalaises jusqu'à la Somalie. Elle pousse sur les sols limoneux légers, bruns argileux, parfois sur lithosols, mais préfère les sols sableux (Arbonnier, 2002). Cette espèce est très résistante à la sécheresse. Elle survit sous un milieu

aux conditions pluviométriques comprises entre 100 et 950 mm et est capable de supporter des périodes de sécheresse d'une durée de 8 à 11 mois (Arbonnier, 2002). *S. senegal* tolère également les températures élevées (jusqu'à 45°C ou plus).

- Utilisations

S. senegal convient particulièrement pour une utilisation en agroforesterie. Elle joue un rôle important dans la lutte contre la désertification, notamment par son rôle de stabilisateur des dunes de sable (grâce à son système racinaire traçant très ramifié, assez dense et long - jusqu'à 13 m du pivot-, pouvant drainer l'eau de pluie sur une surface atteignant 500m²). Elle améliore aussi les sols par la fixation de l'azote et l'apport de litière organique. Les feuilles et les fruits constituent un fourrage très apprécié par le bétail (M'Baré, 2001 ; Arbonnier, 2002 ; Ickowicz *et al.*, 2005). Ils sont riches en protéines digestibles (10-13%) et constituent une source importante de fourrage en saison des pluies et au début de la saison sèche (Von Maydell, 1983). L'importance de sa gomme, la meilleure de toutes celles qui sont commercialisées, lui confère un rôle économique considérable. Elle est utilisée dans l'alimentation (cuisine, pâtisserie, sirops) comme gélifiant et émulsifiant. Le bois est un excellent combustible et est aussi utilisé dans la construction.

VI.2. *Vachelia seyal* (Delile) P. Hurter « Syn. *Acacia seyal* »

- Systématique

A. seyal compte deux variétés : *seyal* et *fistula*. La systématique de *V. seyal* est la suivante :

Règne : *Plantae*

Sous-règne : *Tracheobionta*

Division : *Magnoliophyta*

Classe : *Magnoliopsida*

Sous-classe : *Rosidae*

Ordre : *Fabales*

Famille : *Leguminosae*

Sous-famille : *Mimosoideae*

Tribu: *Acacieae*

Genre : *Vachellia*

Espèce : *seyal*

- Description botanique

V. seyal est arbre de 10 à 12 m de hauteur et 35 à 60 cm de diamètre à maturité avec des branches peu ramifiées, horizontales et ascendantes. L'espèce porte de grandes épines droites localisées sur les branches et de petites épines recourbées situées à l'extrémité des branches. Les jeunes rameaux à poils clairsemés ou glabres présentent de nombreuses glandes sessiles rougeâtres. Les feuilles sont alternes, bipennées de 3 à 10 cm de long et 1 à 15 mm de large, généralement avec 4-8 paires de pinnules et 10 à 20 paires de foliolules par pinnule. Ses fleurs globuleuses jaune brillant ont un diamètre compris entre 10 à 13 mm. Ses gousses de 7 à 20 cm de long et 0,5 à 0,9 cm de diamètre sont déhiscentes, falciformes, rétrécies entre les graines. Elles contiennent 6 à 9 graines brun clair à maturité, elliptiques, comprimées, de 7 à 9 mm de long et 4,5 à 5 mm de large.



Planche photographique 6: Arbre adulte de *V. seyal* entouré de touffes de graminée halophyte (*Sporolus robustus*) en zone salée dans la région de Fatick. (D. Diouf, 2001)

- Ecologie

V. seyal est un arbre typique des régions semi-arides et arides africaines, du Sénégal à travers tout le Sahel jusqu'au Soudan et l'Égypte. Au Sénégal, elle pousse naturellement sur des sols salés et non salés particulièrement dans le Bassin arachidier dans la région naturelle du Sine Saloum. Elle prospère mieux sur les sols alluviaux à texture moyenne à fine entre les

isohyètes de 500 à 700 mm (Mallet *et al.*, 2002). Elle se développe également dans les prairies boisées en particulier sur les sols noirs argileux ou argilo-siliceux, saisonnièrement inondés. Cette espèce tolère des valeurs de pH comprises entre 6 et 8, la salinité et les inondations périodiques.

- Utilisations

V. seyal est une importante source d'énergie en milieu rural à la fois comme bois de chauffe et de charbon de bois. Ses feuilles et ses gousses sont un excellent fourrage pour les ovins, les bovins, les caprins et de nombreux animaux sauvages (Le Houerou, 1980). *V. seyal* est une espèce productrice de gomme arabique et elle est capable d'établir une association avec des bactéries fixatrices d'azote et des champignons endomycorhiziens (Ndoye *et al.*, 1995). Elle est utilisée dans les systèmes agroforestiers pour contribuer à améliorer la fertilité des sols.

VI.3. *Prosopis juliflora* (Sw.) DC.

- Systématique

L'espèce *P. juliflora* compte trois variétés : *juliflora* ; *inermis* et *horrida* (Marcelo, 1990). Sa systématique est la suivante :

Règne : *Plantae*
Sous-règne : *Tracheobionta*
Division : *Magnoliophyta*
Classe : *Magnoliopsida*
Ordre : *Fabales*
Famille : *Mimosaceae*
Genre : *Prosopis*
Espèce : *juliflora*

- Description botanique

P. juliflora (Photo 7) est un arbre épineux à croissance rapide, atteignant 15 m buissonnant ou à fût court (Arbonnier, 2000). Les rameaux sont vert gris à glabres. Les feuilles sont alternes ou fasciculées et bipennées avec 1 ou 3 paires de pinnules. Les inflorescences sont des épis. Les fruits sont des gousses linéaires ressemblant à des haricots dont les deux bouts sont effilés en long bec. *P. juliflora* fleurit deux fois par an, en saison sèche et en début de saison des pluies.



Planche photographique 7: Arbre de *P. juliflora* à côté d'un pied de *Tamarix senegalensis* en zone salée dans la région de Fatick. (D. Fall, 2013)

- Ecologie

Elle prospère sur les sols sableux et rocheux et supporte les sols salés et très acides (Arbonnier, 2000) et requiert des précipitations comprises entre 150 et 750 mm par an. Ses racines pénètrent jusqu'à 25 m ou plus de profondeur dans le sol, utilisant ainsi les nappes d'eau. *P. juliflora* est une espèce agressive et prolifique dont la situation est ambiguë en fonction des acteurs considérés (Ichaou et Ali, 2006). Elle est largement répandue au Pérou, en Argentine, au Mexique, en Bolivie et en Colombie. On la retrouve également en Iran, en Inde, en Afrique du Sud et dans bien d'autres pays. *P. juliflora* convient bien aux climats chauds et secs grâce à son amplitude écologique convenant aux climats sahéliens et sahélo-soudanien.

- Utilisations

Elle est utilisée dans la fixation de dunes, dans les haies vives, pour son bois de chauffage, le charbon de bois et pour l'alimentation du bétail. En médecine locale, l'écorce macérée est utilisée comme antiseptique pour le traitement des ulcères. La farine de gousse de *P. juliflora* est aussi utilisée comme aliment de poisson.

CHAPITRE II : *Etude des niveaux et mécanismes de tolérance à la salinité de Senegalia senegal (L.) Britton, Vachellia seyal (Delile) P. Hurter et Prosopis juliflora (Swartz) DC*

Chapitre II : Etude des niveaux et mécanismes de tolérance à la salinité de *Senegalia senegal* (L.) Britton, *Vachellia seyal* (Delile) P. Hurter et *Prosopis juliflora* (Swartz) DC

Avant-propos

Ce chapitre est subdivisé en deux parties (1 et 2) et a fait l'objet d'un article publié dans *African Journal of Biotechnology*.

Fall D., Bakhom N., Fall F., Diouf F., Ly M.O., Diouf M., Gully D., Hocher V., Diouf D., **2016**. Germination, growth and physiological responses of *Senegalia senegal* (L.) Britton, *Vachellia seyal* (Delile) P. Hurter and *Prosopis juliflora* (Swartz) DC to salinity stress in greenhouse conditions. *African Journal of Biotechnology* Vol. 15 (37): 2017-2027.

Abstract

Salinity is among the most widespread environmental threats to global plant production, especially in arid and semi-arid climates. Thus, the selection of salt tolerant species is necessary for sustainable plant productivity. The purpose of this study was to measure and understand the salt tolerance of three multipurpose trees used in reforestation programs in many Sahelian countries (*Senegalia senegal*, Syn. *Acacia senegal*; *Vachellia seyal*, Syn. *A. seyal*, and *Prosopis juliflora*). The effect of salinity was evaluated at seed germination stage on Petri dishes containing water agar (0.9%, w/v) with seven concentrations of NaCl (0, 86, 171, 257, 342, 428, and 514 mM). Our results showed that all the species had a germination rate higher than 85% at 257 mM. However, it decreased at 342 mM with a reduction of 70 and 20%, respectively for *S. senegal* and *V. seyal*. For plants growth and physiological responses, seedlings were individually cultivated in plastic bags (25.12 cm) containing non-sterile soil and watered with four salt solutions (0, 86, 171 and 257 mM NaCl). Four months after the plants' cultivation, the results showed that for all species, the salinity reduced significantly the height, the collar diameter, the shoot and root dry biomass as well as the total chlorophyll, K⁺ and K⁺/Na⁺ ratio. In the meantime, proline content, Cl⁻ and Na⁺ accumulation in leaves were increased. It was also found that *S. senegal* and *V. seyal* tolerated high concentrations of NaCl (257 mM) and developed physiological and molecular mechanisms, such as salt tolerance genes (NHX1), which allow them to be considered as moderated salt tolerant species and seemed to be potential species for the restoration of salt-affected land as *P. juliflora*.

Key words: Multipurpose leguminous trees, abiotic stress, salt tolerance, Senegal.

Partie 1: Etude des niveaux et mécanismes physiologiques de tolérance à la salinité de *Senegalia senegal* (L.) Britton, *Vachellia seyal* (Delile) P. Hurter et *Prosopis juliflora* (Swartz) DC

I. Introduction

La salinisation des terres est un problème environnemental qui gagne de l'ampleur à travers le monde et représente un facteur limitant majeur de la productivité végétale en particulier dans les régions arides et semi-arides (Zahran, 1999). Plus de 953 millions d'hectares de terres sont affectées par le sel dans le monde entier, soit environ 8% de la surface terrestre de la planète (Singh, 2009). Au Sénégal, 1 700 000 ha sur les 3 800 000 ha de terres arables sont affectés par le sel (FAO-LADA, 2009).

De nombreuses études ont montré que des concentrations élevées de NaCl dans le milieu de croissance des plantes produisent des effets primaires et secondaires qui affectent négativement la croissance et le développement des plantes. Plusieurs fonctions physiologiques telles que la photosynthèse et la nutrition minérale sont affectées par les fortes salinités (Chen *et al.*, 2007). Les effets primaires de la salinité chez la plante sont la toxicité ionique et le stress osmotique. La toxicité ionique se produit en raison de fortes concentrations de Na⁺ et Cl⁻ dans le cytoplasme des cellules. L'abaissement du potentiel hydrique induit un stress osmotique par la réduction de la turgescence et la perte d'eau des cellules. Les effets secondaires du stress salin sont l'inhibition de l'absorption des ions K⁺, le dysfonctionnement de la membrane plasmique et la génération d'espèces réactives de l'oxygène (ROS) dans les cellules (Rout et Shaw, 2001; Ghoulam *et al.*, 2002; Agarwal et Pandey, 2004; Upadhyay et Panda, 2005). La salinité modifie l'activité photosynthétique (teneur en chlorophylles et en caroténoïdes, degré d'ouverture des stomates,...) et le statut hydrique des plantes (teneur relative en eau, potentiel hydrique,...). Les variations de ces paramètres dépendent de la sévérité et de la durée du stress (Misra *et al.*, 1997) et de l'espèce végétale (Dubey, 1994).

L'adaptation des plantes à la salinité pendant la germination et les stades précoces de croissance (jeune plant) est crucial pour l'établissement des plantes dans les milieux salés (Debez *et al.*, 2004; Vicente *et al.*, 2004). Après la germination des graines, les jeunes plants sont les plus vulnérables dans le cycle de vie des plantes (Kigel, 1995). Ainsi, pour réussir la revégétalisation des sols salés, les graines doivent rester viables en présence de forte salinité et être capables de germer en cas de diminution de la salinité (Vicente *et al.*, 2004).

Au Sénégal, la reforestation des zones affectées par la salinité est devenue une priorité. *Senegalia senegal*, *Vachellia seyal* et *Prosopis juliflora* sont des légumineuses à usages multiples (amélioration de la fertilité des sols, production de fourrage, de bois, de gomme arabique,...) sélectionnées dans plusieurs programmes de reboisement. Cependant, peu d'informations existent sur la tolérance à la salinité de *S. senegal* et *V. seyal*. Ainsi, l'objectif de ce premier chapitre est d'évaluer l'effet du NaCl sur la germination et la croissance chez *S. senegal*, *V. seyal* et *P. juliflora*. A cet effet, quelques paramètres physiologiques ont été évalués afin de déterminer les niveaux de tolérance à la salinité et de comprendre les mécanismes de tolérance de ces espèces susceptibles de servir pour la restauration des zones affectés par la salinité dans un contexte de changement climatique.

II. Matériel et méthodes

II. 1. Etude de l'effet de la salinité sur la germination

Les graines de *S. senegal* (Provenance Dahra-2013), *V. seyal* (Provenance Ndiaffate-2013) et *P. juliflora* (Provenance Ndiaffate-2013) ont été fournies par le Centre National de Recherches Forestières (CNRF) de l'Institut Sénégalais de Recherches Agricoles (ISRA). Les graines ont été scarifiées et désinfectées superficiellement dans de l'acide sulfurique concentré à 95 % pendant 30 min pour *V. seyal* et 15 min pour *S. senegal* et *P. juliflora*. Les graines ont ensuite été rincées plusieurs fois avec de l'eau déminéralisée stérile. Le substrat de germination était constitué d'eau gélosée (0,9 %) stérile contenant 0 ; 5 ; 10 ; 15 ; 20 ; 25 et 30 g/l de NaCl.

Les graines préparées, ont été disposées dans les boîtes de *Petri* contenant de l'eau gélosée stérile avec une dose définie de sel. Pour de chaque espèce, 60 graines (3 lots x 20 graines) ont été utilisées par dose de NaCl.

La germination a été suivie pendant 10 jours par le dénombrement quotidien des graines ayant germé. Le critère retenu pour désigner une graine germée est la percée radiculaire. Le taux de germination d'une espèce pour une dose de NaCl est exprimé en pourcentage de germination. Les valeurs obtenues au dixième jour ont permis de déterminer le taux de germination des espèces en fonction de la dose de NaCl.

II. 2. Etude de l'effet de la salinité sur la croissance et les paramètres physiologiques

Des graines de *S. senegal*, de *V. seyal* et de *P. juliflora*, prétraitées comme décrit précédemment, ont été prégermées sur de l'eau gélosée non salée. Les plants de *S. senegal*, de *V. seyal* et de *P. juliflora* ont été cultivés dans des gaines (12 cm x 25 cm) contenant du sol non salé et non stérile de Sadioga (Tableau 3).

Tableau 3:Caractéristiques physiques et chimiques du sol non salé de Sadioga

Caractéristiques physiques	Valeurs
Argiles	05,5 %
Limons	11,5 %
Sables	83,0 %
Caractéristiques chimiques	
pH H ₂ O	5,5
Conductivité électrique (25°C)	27 µS/cm
Salinité	0,00 ‰
Azote total	0,05 %
Carbone total	0,56 %
Phosphorus total	52,00 mg/kg
Calcium (Ca)	0,78 méq%
Magnésium (Mg)	0,25 méq%
Sodium (Na)	0,09 méq%
Potassium (K)	0,15 méq%
Capacité d'échange cationique (CEC)	2,99 méq%

Afin d'éviter le choc ionique, le stress salin a été appliqué après un mois de culture et de manière graduelle à raison de 2,5 g/l de NaCl par jours d'arrosage jusqu'à l'atteinte de la concentration souhaitée. Les plants ont ensuite été arrosés avec cette même concentration tous les deux jours. La concentration de l'eau de lessivage a été régulièrement suivie par un salinomètre (photo 8). Après 3 mois de stress (4 mois de croissance), les mensurations de la hauteur et du diamètre au collet des plants ont été effectuées respectivement à l'aide d'une règle graduée et d'un pied à coulisse. La hauteur a été évaluée du collet au bourgeon terminal (photos 9 c, d). Les poids de matières sèches aérienne et racinaire ont été déterminés par pesée à l'aide d'une balance de précision.



Planche photographique 8 : Arrosage des plants (a) et mesure de la salinité avec un salinomètre (b)

La teneur relative en eau (TRE) a été déterminée. Sur chaque plant, un fragment de rameau (environ 5 cm de long) a été coupé puis son poids frais (PF) a été pris immédiatement. Après réhydratation pendant 24 h dans de l'eau déminéralisée, le fragment a été essuyé puis pesé immédiatement pour obtenir le poids à la turgescence (PT). Enfin, il a été séché à l'étuve à 65°C pendant 96 h et repesé pour avoir le poids sec (PS). La TRE a été calculée par la formule suivante de Barrs (1968) : $TRE (\%) = ((PF-PS)/(PT-PS)) \times 100$. Le potentiel hydrique foliaire de tige a été mesuré à l'aide d'une chambre à pression de Scholander (Scholander et al., 1965) (photo 9e).



Planche photographique 9 : Mesures du diamètre au collet (c), de la hauteur (d) et du potentiel hydrique foliaire (e)

L'indice de tolérance a été calculé selon la formule de Cano *et al.* (1998) : $IT (\%) = (BAS \text{ plant stressé} / BAS \text{ plant témoin}) * 100$

III. Résultats

III.1. Effet du NaCl sur la germination des graines

L'effet du NaCl sur la germination des graines de *S. senegal*, *V. seyal* et *P. juliflora*, évalué par le pourcentage de graines ayant germées après 10 jours, est représenté sur la Figure 3. Les résultats ont montré que, pour toutes les espèces, le taux de germination diminue avec l'augmentation de la concentration de NaCl. Néanmoins, l'effet négatif du NaCl varie selon les espèces.

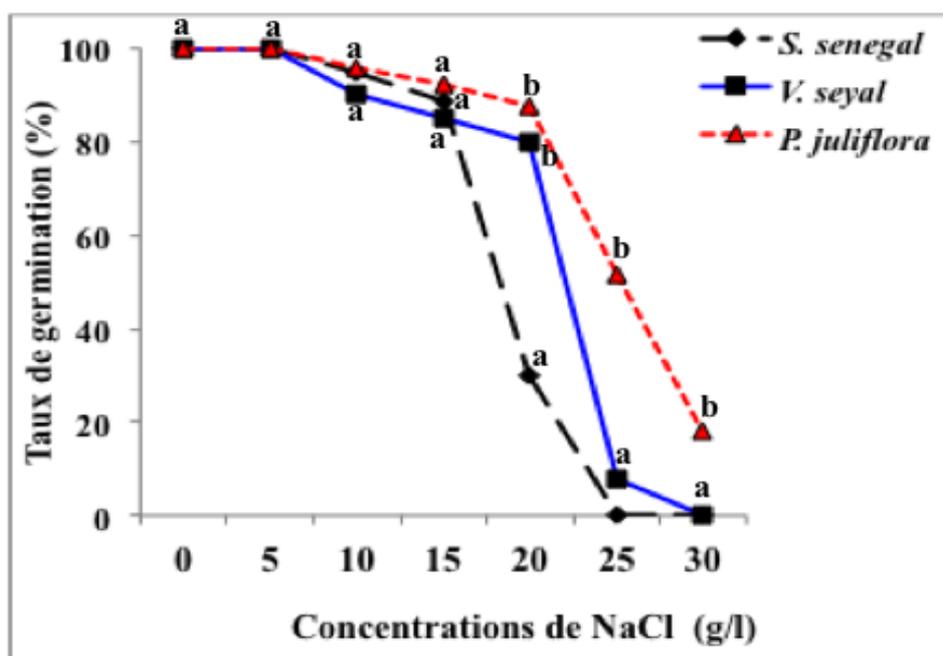


Figure 3: Effet du NaCl sur la germination des espèces sur boîtes de *Petri* pendant 10 jours

Pour chaque concentration de NaCl, les taux de germination avec les mêmes lettres ne sont pas significativement différents au seuil de 5% selon le test Student-Newman-Keuls.

Pour des concentrations de NaCl inférieures ou égales à 15 g/l, le taux de germination est sensiblement égal à 100%. Cependant, à partir de cette concentration, une différence dans la tolérance à la salinité s'observe entre les espèces. A partir de 25 g/l de NaCl, une baisse de 100% (pas de germination), 92% et 48% est observée respectivement chez *S. senegal*, *V. seyal* et *P. juliflora*. A 30 g/l, aucune germination n'a été observée chez *V. seyal* tandis que le taux de germination pour *P. juliflora* n'est que de 18% par rapport aux plants témoins sans sel.

III.2. Effet du NaCl sur la croissance des espèces

Les résultats ont montré que la salinité réduit la hauteur, les biomasses aérienne et racinaire sèches des plants de *S. senegal*, *V. seyal* et *P. juliflora* (Tableau 4). Toutefois, même si aucune

différence significative n'a été notée entre les traitements, le diamètre au collet semble augmenter avec la concentration de NaCl, quelle que soit l'espèce considérée.

Tableau 4: Effet de différentes concentrations de NaCl (0, 5, 10 et 15 g/l) sur le diamètre au collet, la hauteur, les biomasses aérienne et racinaire sèches des plants de *S. senegal*, *V. seyal* et *P. juliflora* cultivés pendant 4 mois en gaines

Espèces	NaCl (g/l)	Dia. col. (mm/plant)	Hauteur (cm/plant)	BAS (g/plant)	BRS (g/plant)
<i>S. senegal</i>	0	4,25±0,43a	19,97±1,60a	0,95±0,06b	2,41±0,30b
	5	4,42±0,29a	18,57±1,29a	0,92±0,03b	2,03±0,14ab
	10	4,89±0,45a	16,43±0,75a	0,75±0,24b	1,69±0,48ab
	15	4,98±0,13a	15,83±3,33a	0,28±0,03a	1,04±0,64a
<i>V. seyal</i>	0	2,60±0,36a	26,90±5,91a	1,16±0,03c	1,62±0,04b
	5	2,33±0,49a	24,13±4,23a	0,62±0,12b	1,46±0,13b
	10	2,34±0,52a	20,47±4,68a	0,55±0,15b	0,94±0,11a
	15	2,77±0,42a	21,27±1,54a	0,28±0,03a	0,79±0,14a
<i>P. juliflora</i>	0	2,18±0,17a	25,87±1,40a	0,67±0,07a	0,49±0,12b
	5	2,51±0,52a	27,80±5,30a	0,73±0,27a	0,35±0,18ab
	10	2,35±0,25a	23,13±2,67a	0,42±0,10a	0,26±0,07ab
	15	2,32±0,06a	19,73±2,25a	0,42±0,08a	0,14±0,02a

Pour chaque espèce, les valeurs de la même colonne suivies par les mêmes lettres ne sont pas significativement différentes au seuil de 5% selon le test Student-Newman-Keuls.

Dia. col. = diamètre au collet; **BAS** = Biomasse Aérienne Sèche; **BRS** = Biomasse Racinaire Sèche

Les faibles concentrations de NaCl (5 g/l) semblent stimuler la croissance (hauteur et biomasse aérienne sèche) de *P. juliflora*. Aucun effet significatif de la salinité n'a été observé sur la hauteur des trois espèces et la biomasse aérienne sèche (BAS) de *P. juliflora*. Toutefois, une réduction de 24%, 21% et 21% a été respectivement observée chez les plants de *P. juliflora*, *S. senegal*, et *V. seyal* cultivés en présence de 15 g/l de NaCl. En revanche, un effet négatif significatif a été noté sur les BAS des plants de *V. seyal* et *S. senegal* avec respectivement une baisse de 76% et 71% pour les plants cultivés en présence de 15 g/l par rapport aux plants témoins. A l'image de la BAS, à 15 g/l de NaCl, une baisse de 71%, 57% et 51% de la biomasse aérienne sèche a été respectivement notée chez *P. juliflora*, *S. senegal* et *V. seyal* comparé aux plants témoins (Tableau 4).

III.3. Effet du NaCl sur quelques paramètres physiologiques des espèces

Les teneurs en chlorophylles et en proline n'ont été déterminées chez les plants de *S. senegal* cultivés en présence de 15 g/l de NaCl à cause de l'absence de feuilles à cette concentration de NaCl. Le tableau 5 montre les teneurs en chlorophylles (a + b) et en proline, la teneur relative en eau (TRE) et le potentiel hydrique foliaire (Ψ) des plants de *S. senegal*, *V. seyal* et *P. juliflora*. Les résultats ont montré que la teneur en chlorophylles diminue avec l'augmentation de la concentration en NaCl chez *S. senegal* et *V. seyal* et semble augmenter chez *P. juliflora*. Le pourcentage de réduction de la teneur en chlorophylles en présence de 10 g/l de NaCl est de 65% et 9%, respectivement chez *S. senegal* et *V. seyal* tandis qu'une augmentation de 11% a été observée chez *P. juliflora*. Contrairement à la chlorophylle, la teneur en proline augmente avec la concentration en NaCl. Cette augmentation est plus prononcée chez *P. juliflora*, *S. senegal* et *V. seyal* avec respectivement 208%, 95% et 73%.

Tableau 5: Effet de différentes concentrations de NaCl (0, 5, 10 et 15 g/l) sur les teneurs en chlorophylles (a + b), en proline, la teneur relative en eau et le potentiel hydrique foliaire des plants de *S. senegal*, *V. seyal* et *P. juliflora* cultivés pendant 4 mois en gaines

Espèces	NaCl (mM)	Chlorophylle (mg/g MF)	Proline (μ g/g MF)	TRE (%)	Pot. Hyd. (MPa)
<i>S. senegal</i>	0	2,17 \pm 0,13c	1,08 \pm 0,02a	83,1 \pm 1,8a	-1,03 \pm 0,15b
	5	1,41 \pm 0,05b	1,09 \pm 0,01a	84,1 \pm 2,4a	-1,13 \pm 0,14b
	10	0,75 \pm 0,03a	2,11 \pm 0,14b	89,1 \pm 6,2ab	-1,24 \pm 0,10ab
	15	<i>Nd</i>	<i>nd</i>	90,8 \pm 3,6b	-1,30 \pm 0,05a
<i>V. seyal</i>	0	2,31 \pm 0,13c	0,11 \pm 0,01a	86,2 \pm 1,1a	-1,17 \pm 0,04b
	5	2,78 \pm 0,15d	0,12 \pm 0,04ab	85,9 \pm 4,3a	-1,20 \pm 0,10b
	10	2,10 \pm 0,07b	0,19 \pm 0,03b	78,4 \pm 0,4a	-1,18 \pm 0,08b
	15	1,84 \pm 0,03a	0,55 \pm 0,02c	75,6 \pm 11,9a	-1,43 \pm 0,10a
<i>P. juliflora</i>	0	1,79 \pm 0,04a	1,01 \pm 0,01a	90,7 \pm 1,4a	-0,67 \pm 0,10b
	5	2,52 \pm 0,02c	1,02 \pm 0,01a	82,6 \pm 7,7a	-1,00 \pm 0,11a
	10	1,92 \pm 0,05b	3,11 \pm 0,01b	87,1 \pm 1,5a	-1,15 \pm 0,12a
	15	1,99 \pm 0,03b	5,00 \pm 0,05c	85,1 \pm 2,3a	-1,17 \pm 0,05a

Pour chaque espèce, les valeurs de la même colonne, suivies par les mêmes lettres ne sont pas significativement différentes au seuil de 5% selon le test Student-Newman-Keuls.

MF = Matière Fraiche ; **TRE** = Teneur Relative en Eau ; **Pot. Hyd.** = Potentiel hydrique ; **nd** = non déterminé

Aucune différence significative (sauf chez *S. senegal* à 15 g/l) n'a été observée dans la TRE des plants cultivés en présence de NaCl par rapport aux plants témoins. Toutefois, la TRE semble augmenter chez *S. senegal* et diminuer chez *V. seyal* et *P. juliflora* avec l'augmentation de la concentration de NaCl. Les résultats montrent que le Ψ devient de plus en plus négatif avec l'augmentation de la concentration en NaCl et une différence significative a été notée entre les plants stressés et ceux témoins (Tableau 5). En présence 10 g/l de NaCl, le Ψ est négativement augmentée de 75%, 26% et 22%, respectivement chez *P. juliflora*, *S. senegal* et *V. seyal*.

III.4. Effet du NaCl sur l'accumulation des ions Cl^- , Na^+ et K^+ entre les racines et les feuilles

Les résultats montrent une accumulation des ions Na^+ et Cl^- dans les feuilles et les racines avec l'augmentation de la concentration en NaCl et une baisse des ions K^+ (Tableau 6). Cette accumulation est plus élevée dans les feuilles que dans les racines chez *S. senegal* et *V. seyal* alors que chez *P. juliflora*, elle est plus importante dans les racines. Cependant, l'accumulation des ions K^+ est plus élevée dans les feuilles pour toutes les espèces. En présence de 10 g/l de NaCl, une augmentation de 6%, 164% et 278% de la teneur des feuilles en Cl^- a été notée respectivement chez *P. juliflora*, *S. senegal* et *V. seyal*. Cependant, la teneur des feuilles en Na^+ augmente de 471%, 1093% et 3050% respectivement chez *P. juliflora*, *V. seyal* et *S. senegal*. Les résultats montrent également une baisse du rapport K^+/Na^+ dans les racines et les feuilles.

Tableau 6: Teneur des éléments minéraux (g/kg de matière sèche) dans les racines et les feuilles des plants de *S. senegal*, *V. seyal* et *P. juliflora* cultivés pendant 4 mois en gaines sous 4 concentrations de NaCl (0, 5, 10 et 15 g/l)

Espèces	NaCl (g/l)	Cl ⁻		Na ⁺		K ⁺		K ⁺ /Na ⁺	
		Racines	Feuilles	Racines	Feuilles	Racines	Feuilles	Racines	Feuilles
<i>S. senegal</i>	0	*A11,0±3,1a**	A12,4±2,5a	^A 1,6±0,7a	^A 0,4±0,2a	^A 9,3±2,8a	^A 27,4±1,9b	^D 5,8±1,7a	^C 68,5±4,6b
	5	^{AB} 17,0±3,6a	^B 26,2±2,8b	^B 4,2±1,4a	^B 6,9±1,1b	^A 7,7±1,6a	^A 26,9±2,8b	^C 1,9±0,2a	^B 3,9±0,2b
	10	^B 18,0±1,5a	^C 32,7±1,1b	^{BC} 7,0±1,8a	^C 12,6±3,3b	^A 7,2±0,7a	^A 24,3±3,5b	^B 1,0±0,1a	^A 1,9±0,1b
	15	^B 22,2±3,6	nd	^C 11,2±4,4	nd	^A 7,1±0,2	nd	^A 0,6±0,12	nd
<i>V. seyal</i>	0	^A 14,6±0,6b	^A 8,8±1,2a	^A 5,8±0,9b	^A 1,4±1,0a	^A 11,9±3,2a	^C 24,5±2,5b	^B 2,1±1,0a	^C 17,5±2,9b
	5	^B 29,1±4,9a	^B 25,8±4,1a	^A 7,1±0,7a	^B 12,8±1,5b	^A 10,0±1,3a	^A 17,2±2,6b	^A 1,4±0,4a	^B 1,3±0,1a
	10	^B 24,9±4,2a	^B 33,3±2,5b	^A 7,3±1,5a	^B 16,7±2,2b	^A 9,5±1,9a	^A 16,7±2,5b	^A 1,3±0,2a	^{AB} 1,0±0,2a
	15	^B 24,2±2,2a	^B 32,2±3,0b	^A 8,2±2,8a	^C 23,4±0,9b	^A 8,7±2,3a	^A 15,9±1,1b	^A 1,1±0,1b	^A 0,7±0,2a
<i>P. juliflora</i>	0	^A 14,6±2,6a	^A 17,3±1,9a	^A 4,1±0,1b	^A 2,1±1,5a	^A 14,3±0,3a	^A 28,9±2,4b	^C 3,5±0,1a	^C 13,8±1,3b
	5	^B 29,1±4,9b	^B 21,1±1,7a	^B 15,2±2,9b	^B 9,7±1,0a	^A 11,6±0,6a	^B 17,7±1,6b	^B 0,8±0,2a	^B 1,8±0,3b
	10	^C 36,8±2,6b	^{AB} 18,3±2,4a	^C 20,0±1,9b	^B 9,9±1,2a	^A 10,2±1,6a	^B 17,5±4,1b	^{AB} 0,5±0,1a	^A 1,8±0,25b
	15	^C 40,9±2,1b	^{AB} 18,9±0,7a	^C 21,6±4,2b	^B 12,0±1,1a	^A 9,4±1,6a	^B 17,2±0,6b	^A 0,4±0,1a	^A 1,4±0,1b

* Pour chaque espèce, les valeurs de la même colonne, précédées par les mêmes lettres en majuscule comparant l'effet du NaCl, ne sont pas significativement différentes au seuil de 5% selon le test Student-Newman-Keuls.

** Pour chaque élément minéral, les valeurs de la même colonne, suivies par les mêmes lettres en minuscule comparant la répartition des éléments entre les racines et les feuilles, ne sont pas significativement différentes au seuil de 5% selon le test Student-Newman-Keuls.

nd = non déterminé

III.5. Indices de tolérance à la salinité

Les résultats montrent que quel que soit le stade de développement des plants (germination ou croissance), l'indice de tolérance au sel (IT) diminue avec l'augmentation de la concentration de NaCl (Tableau 7). A la germination, aucune différence significative n'a été notée entre les IT des espèces pour des concentrations de NaCl inférieures ou égales à 15 g/l avec 92%, 89% et 85% respectivement chez *P. juliflora*, *S. senegal* et *V. seyal*.

Tableau 7: Indices de tolérance à la salinité (%) de *S. senegal*, *V. seyal* et *P. juliflora* aux stades germination et croissance (Biomasse aérienne sèche) après 4 mois de culture dans des gaines.

Stades	Espèces	Concentrations de NaCl (g/l)						
		0	5	10	15	20	25	30
Germination	<i>S. senegal</i>	100±0a	100±0a	95±5a	89±4a	30±4a	0±0a	0±0a
	<i>V. seyal</i>	100±0a	100±0a	90±3a	85±3a	80±5b	8±1b	0±0a
	<i>P. juliflora</i>	100±0a	100±0a	96±4a	92±4a	88±4b	52±3c	18±2b
Croissance	<i>S. senegal</i>	100±0a	97±4b	79±5c	29±4a	nd	nd	nd
	<i>V. seyal</i>	100±0a	53±3a	47±5a	24±3a	nd	nd	nd
	<i>P. juliflora</i>	100±0a	109±9b	63±6b	63±5b	nd	nd	nd

Pour chaque colonne, les valeurs suivies par les mêmes lettres ne sont pas significativement différentes au seuil de 5% selon le test Student-Newman-Keuls.

nd= non déterminé

Lorsque la concentration de NaCl dépasse 15 g/l, une différence significative s'observe entre les espèces. Pour *S. senegal*, cet indice est de 30% à 20 g/l et devient nul (0%) à partir de 25 g/l tandis qu'il est de 8% et 52%, respectivement chez *V. seyal* et *P. juliflora*. A 30 g/l, l'indice de tolérance est nul (0%) chez *V. seyal* et atteint 18% chez *P. juliflora* (tableau 7). Pour la croissance (biomasse aérienne), les IT de *P. juliflora* et *S. senegal* sont significativement plus élevés que celui de *V. seyal* aux concentrations 5 g/l et 10 g/l. A 5 g/l, aucune différence significative n'a été observée entre *S. senegal* et *P. juliflora*. A 15 g/l, l'IT de tolérance de *P. juliflora* est significativement plus élevé que ceux de *S. senegal* et *V. seyal* avec respectivement 63%, 29% et 24% respectivement.

V. Discussion

Nos résultats ont montré que le taux de germination diminue avec l'augmentation de la concentration de NaCl pour toutes les espèces. L'effet négatif du sel sur la germination des graines pourrait s'expliquer par une inhibition de leur hydratation. En effet, les fortes concentrations de NaCl dans le substrat de germination augmente son potentiel osmotique, ce qui limite l'hydratation (imbibition) des graines (Tobe *et al.*, 2000; El-Keblawy et Al-Rawai, 2005). Cet effet pourrait également être dû à l'effet toxique du NaCl sur l'embryon ou sur les membranes cellulaires (Bliss *et al.*, 1986; Khajeh-Hosseini *et al.*, 2003). Sur la base de leur tolérance au sel à la germination, les espèces peuvent être classées comme suit: *P. juliflora* > *V. seyal* > *S. senegal*. Des résultats similaires ont été obtenus par plusieurs études (El-Tayeb, 2005; Fall *et al.*, 2009 ; Abari *et al.*, 2011; Tsegay et Gebreslassie, 2014; Sharma et Vimala, 2016). Il est important de noter que les faibles concentrations de NaCl ont un effet relativement faible sur la germination des graines de *V. seyal* et *P. juliflora*.

La salinité du milieu diminue la croissance (hauteur, biomasses aérienne et racinaire sèches) des plants de *S. senegal*, *V. seyal* et *P. juliflora* et que son effet dépend du taux de salinité et de l'espèce. Plusieurs phénomènes peuvent expliquer cette diminution de la croissance des plantes (Alam *et al.*, 2004). En effet, la salinité peut réduire la photosynthèse, qui à son tour limite l'approvisionnement des cellules en hydrates de carbone nécessaires à la croissance (da Silva *et al.*, 2011). Une deuxième possibilité est que la salinité réduit la turgescence des cellules, ce qui peut diminuer l'expansion des tissus. En outre, une perturbation de l'approvisionnement en éléments minéraux, soit un excès ou un déficit, induit par des changements dans les concentrations d'ions spécifiques dans le milieu de croissance (Na^+ , Cl^- , ...), pourrait affecter directement la croissance des plants (Lazof et Bernstein, 1998; Zhu, 2002). Nos résultats sont en concordance avec ceux obtenus par Abari *et al.* (2011), Saini *et al.* (2012), Sharma et Vimala (2016). La faible concentration de NaCl (5 g/l) semble stimuler la croissance des plants de *P. juliflora*. Ce résultat corrobore ceux obtenus par Viégas *et al.* (2004) sur la même espèce en conditions hydroponiques. La chute des feuilles à 15 g/l de NaCl, observée chez *S. senegal* et *V. seyal*, réduit la surface photosynthétique, ce qui se traduit par la réduction de la croissance des plants. Sur la base de leur tolérance à la salinité au stade croissance (production de biomasse aérienne), les espèces peuvent être classées comme suit: *P. juliflora* > *S. senegal* > *V. seyal*. Ce classement est confirmé par les indices de tolérance à la salinité, qui est de 63%, 29% et 24%, respectivement pour *P. juliflora*, *S. senegal* et *V. seyal*.

La teneur en chlorophylles (a + b) diminue significativement avec l'augmentation de la concentration de NaCl pour toutes les espèces. Cette diminution est un phénomène fréquemment observé chez les plantes cultivées en condition de stress salin. Elle est liée à ses effets néfastes sur la stabilité de la membrane (Achraf et Bhatti, 2000), à la baisse du complexe protéine-pigment-lipide (Ayala-Astorga et Alcaraz-Meléndez, 2010) et à l'augmentation de la chlorophyllase (EC: 3.1.1.14) (Lakhdar *et al.*, 2008). En outre, Santos (2004) a montré que la baisse de la teneur en chlorophylle en présence de fortes concentrations de NaCl est principalement due à une diminution de la synthèse de l'acide aminolinolique (ALA) provoquant ainsi une réduction de sa synthèse. Nos résultats corroborent ceux obtenus par plusieurs auteurs (Hardikar et Pandey, 2008; Turan *et al.*, 2009; Molazem *et al.*, 2010; Heidari, 2012; Taibi *et al.*, 2016). En revanche, l'augmentation de la concentration de NaCl semble stimuler la teneur en chlorophylle chez *P. juliflora* suggérant qu'elle est plus tolérante à la salinité que *S. senegal* et *V. seyal* dont leur teneur en chlorophylle a diminué.

Contrairement à la chlorophylle, la teneur en proline augmente avec la concentration de NaCl chez toutes les espèces. Il est admis que les plantes tolérantes à la salinité se distinguent par leur capacité à accumuler de fortes concentrations d'osmotocums (glycine bêtaïne, proline,...) compatibles avec le métabolisme cellulaire pour équilibrer la pression osmotique des ions dans la vacuole. L'augmentation de la proline peut être provoquée par l'induction ou l'activation de sa synthèse à partir du glutamate ou une diminution de son utilisation dans la synthèse des protéines. La forte accumulation de la proline indique que *S. senegal* (95%) et *V. seyal* (73%) semblent avoir la capacité de tolérer la salinité comme *P. juliflora* (208%). Des résultats similaires ont été observés chez de nombreuses espèces végétales telles que *A. auriculiformis* (Diouf *et al.*, 2005), le palmier dattier (Sané *et al.*, 2005), le riz (Shereen *et al.*, 2007), le maïs (Cha-um et Kirdmanee, 2009), le noyer (Akça et Samsunlu, 2012), la patate (Jaarsma *et al.*, 2013).

La teneur relative en eau (TRE) et le potentiel hydrique foliaire (PH) sont les paramètres de base de l'état hydrique de la plante. L'état hydrique est le principal facteur influant sur la croissance et le développement des plantes. Même si aucune différence significative n'a été observée, la baisse de la TRE chez *V. seyal* et *P. juliflora* cultivé montre que la salinité entraîne la déshydratation des cellules et donc provoque un stress hydrique. Cette situation est commune en réponse à la salinité chez plusieurs espèces telles que le poivre (Navarro *et al.*, 2003), *Avicennia germinans* (L.) (Suárez et Medina, 2008). Par conséquent, l'ajustement

osmotique au niveau cellulaire est nécessaire étant donné que le maintien de la turgescence des cellules est nécessaire pour leur expansion et les processus biochimiques, physiologiques et de développement (Flowers, 2004). Toutefois, la TRE semble augmenter chez *S. senegal*. Cette exception peut être expliquée par la réduction et / ou l'absence de feuilles, ce qui réduit la transpiration et permet la rétention de l'eau dans les cellules. Le potentiel hydrique foliaire devient de plus en plus négatif avec l'augmentation de la concentration de NaCl indiquant que ces espèces ajustent leur pression osmotique en réponse à l'augmentation de la salinité. Le potentiel hydrique est négativement augmenté de 75%, 26% et 22%, respectivement chez *P. juliflora*, *S. senegal* et *V. seyal*, suggérant que *P. juliflora* ajuste mieux sa pression osmotique suivi de *S. senegal* et *V. seyal*.

Selon Greenway et Munns (1980), le NaCl est la forme prédominante de sel dans la plupart des sols salins, ce qui augmente la teneur en ions Na^+ et Cl^- et par conséquent affecte l'absorption d'autres éléments minéraux tels que le calcium et le potassium. Nos résultats ont montré une forte accumulation des ions Cl^- et Na^+ dans les feuilles et les racines et une baisse de l'accumulation des ions K^+ et du rapport K^+/Na^+ dans ces organes. La forte accumulation de Na^+ dans les feuilles pourrait être responsable de leur chute comme observée chez les plants de *S. senegal* et *V. seyal* cultivés en présence de fortes concentrations de NaCl. Des études antérieures ont montré que la salinité augmente la teneur des ions Na^+ et Cl^- et diminue l'absorption des ions K^+ et le rapport K^+/Na^+ dans les feuilles des plantes (Saghir *et al.*, 2002; Hosseini et Thengane, 2007; Taffouo *et al.*, 2010; Silini *et al.*, 2016). Ceci implique une compétition dans l'absorption des ions Na^+ et K^+ avec comme conséquence une baisse du rapport Na^+/K^+ (Mori *et al.*, 2011). Il est bien établi que de nombreux systèmes de transport de K^+ ont une forte affinité avec Na^+ (Rodriguez-Navarro et Rubio, 2006). Ce qui pourrait justifier d'une part la prédominance des ions Na^+ par rapport aux ions K^+ .

VI. Conclusion et perspectives

Nos résultats ont montré que le stress salin réduit le taux de germination, la croissance, la teneur en chlorophylles, la teneur relative en eau, le potentiel hydrique foliaire, l'accumulation K^+ et le rapport K^+/Na^+ des plants de *S. senegal*, *V. seyal* et *P. juliflora*. En revanche, une augmentation de l'accumulation de la proline, des ions Na^+ et Cl^- a été notée dans les mêmes conditions de salinité. Toutefois, pour des concentrations de NaCl inférieures ou égales à 15 g/l, les résultats ont montré que le taux de germination est proche de 100% et la croissance est relativement importante. L'accumulation des ions Na^+ et Cl^- est plus importante dans les

feuilles, ce qui indique que ces espèces sont accumulateurs d'ions. Tenant compte de nos résultats préliminaires, *S. senegal* et *V. seyal* peuvent être considérées comme des espèces susceptibles d'être utilisées pour revégétaliser les sols affectés par la salinité comme *P. juliflora*. Cependant, des essais en milieu réel devront être effectués pour confirmer cette capacité.

Partie 2: Etude des mécanismes moléculaires de tolérance à la salinité de *Senegalia senegal* (L.) Britton, *Vachellia seyal* (Delile) P. Hurter et *Prosopis juliflora* (Swartz) DC

I. Introduction

La salinisation des sols affecte négativement la croissance des plantes. Plusieurs mécanismes sont impliqués dans la tolérance des plantes à la salinité. En conditions de stress salin, les ions Na^+ sont accumulés dans les feuilles âgées, suivie des jeunes feuilles (Vera-Estrella *et al.*, 2005). Les résultats obtenus dans la première partie de ce chapitre, ont montré une accumulation de proline, des ions Na^+ et Cl^- dans les feuilles mais également chute de ces dernières. La tolérance à la salinité est souvent associée à la capacité des cellules végétales à maintenir la concentration de sodium cytosolique faible. Les stratégies pour le maintien d'un niveau élevé K^+/Na^+ rapport dans le cytosol comprennent l'exclusion du Na^+ et/ou sa compartimentation intracellulaire. La présence d'acides organiques dans les vacuoles des cellules végétales permet l'efficacité de la compartimentation du sodium dans la vacuole par l'antiporteur vacuolaire Na^+/H^+ (Apse *et al.*, 1999; Blumwald et Poole, 1985). Elle permet d'éviter les effets délétères du Na^+ dans le cytosol. Il est établi que l'adaptation à la salinité induit chez la plante l'expression de gènes qui ont pu être mis en évidence chez différentes espèces telles que *Arabidopsis thaliana* ou le riz (Vij et Tyagi, 2007 ; Munns et Tester, 2008 ; Sanchez *et al.*, 2011). Certains gènes tels que HKT, AKT, NHX et SOS1 sont impliqués dans le transport des ions Na^+ et K^+ , et donc sont de bons marqueurs moléculaires de tolérance des plantes à la salinité (Munns, 2005). Le gène HKT permet le transport des ions Na^+ et K^+ à partir des racines vers les parties aériennes (feuilles,...) et donc participe au maintien du ratio K^+/Na^+ dans la racine (Munns, 2005). Le gène AKT, qui est un canal pour K^+ , a une plus grande sélectivité pour K^+ que pour Na^+ (Munns, 2005). Le gène NHX code pour un antiporteur Na^+/H^+ localisé sur la membrane de la vacuole (tonoplaste) qui permet la séquestration des Na^+ dans la vacuole (Apse *et al.*, 1999 ; Munns, 2005). Il s'exprime dans les racines et les feuilles. Le transporteur de type SOS1 est un antiporteur Na^+/H^+ situé sur la membrane cellulaire, impliqué dans l'expulsion de Na^+ de la cellule (Munns, 2005). Des études ont montré qu'une surexpression du gène *NHX1* en conditions salines chez plusieurs espèces telles que *Arabidopsis* (Apse *et al.*, 1999 ; Brini *et al.* 2007)), le riz (Chen *et al.*, 2007), la tomate (Zhang et Blumwald, 2001), le colza (Zhang *et al.*, 2001), leur confère une adaptation à la salinité Il serait donc intéressant d'estimer le niveau d'expression de ce gène chez *Senegalia senegal*, *Vachellia seyal* et *Prosopis juliflora* et de suivre les variations de

cette expression selon les conditions de salinité. A notre connaissance, aucune étude n'a été effectuée sur *S. senegal* et *V. seyal*. Ainsi, cette deuxième partie a pour objectif de mettre au point les différentes étapes nécessaires à la PCR quantitative pour évaluer l'expression du gène *NHX1* chez *S. senegal*, *V. seyal* et *P. juliflora* sous différentes conditions salines.

II. Matériel et méthodes

II.1. Matériel végétal

Des plants de *S. senegal*, *V. seyal* et *P. juliflora* ont été cultivés en serre dans des pots contenant un mélange vermiculite et tourbe pendant 3 semaines (photo 10). En parallèle, des semis ont été effectués en boîtes de Petri pendant 7 jours afin d'obtenir des racines jeunes non encore lignifiées (photo 11).



Planche photographique 10 : Plants de *S. senegal*, *V. seyal* et *P. juliflora* cultivés en pots contenant vermiculite et tourbe pendant 3 semaines

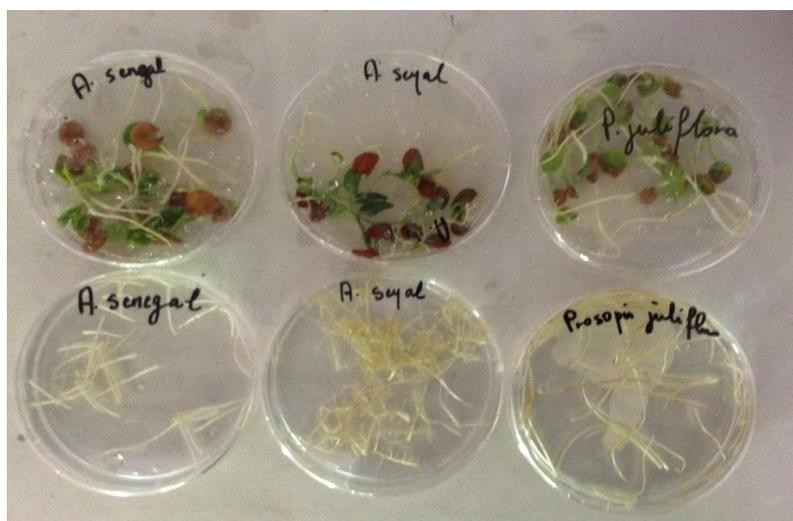


Planche photographique 11 : Plants de *S. senegal*, *V. seyal* et *P. juliflora* cultivés *in vitro* pendant 7 jours

II.2. Extraction des ARN totaux

Les échantillons de feuilles et racines ont été broyés dans de l'azote liquide. Le kit RNeasy Plant Mini (Qiagen, France) a été utilisé pour les extractions d'ARN. Trois protocoles d'extraction ont été testés. Ils diffèrent par la composition du tampon et des conditions d'extraction.

- Protocole 1

Il s'agit du protocole donné par le fournisseur. Cent (100) mg de poudre de chaque échantillon (racines et feuilles) ont été lysés dans 450 µl de tampon dénaturant à base d'isothiocyanate de guanidine (Tampon RTL) additionné de β-Mercaptoéthanol (1 µl pour 100 µl de tampon de lyse) et l'ensemble est homogénéisé à l'aide d'un vortex.

- Protocole 2

Nous avons modifié le tampon d'extraction et ajouté une incubation à 56°C. Cent (100) mg de poudre de chaque échantillon (racines et feuilles) ont été lysés dans 1 ml de tampon (1 ml du tampon RTL, 10 mg de polyvinylpyrrolidone et 10 µl β-Mercaptoéthanol). Après avoir bien vortexé, le mélange a été incubé à 56 °C dans un bain marie pendant 2 min.

- Protocole 3

Ce protocole est une variante du précédent adapté pour le matériel ligneux. Il a été établi par Qiagen dans la fiche technique N° RY06.doc dec-01. Cent (100) mg de poudre de chaque échantillon (racines et feuilles) ont été lysés dans 1 ml de tampon de lyse (guanidine isothiocyanate 4 M ; sodium acétate 0,2 M pH 5 ; EDTA 25 mM ; Polyvinylpyrrolidone 2,5%) additionné de β-Mercaptoéthanol (1 µl pour 100 µl de tampon de lyse. Ensuite 100 de sarkosyl 20% ont été ajoutés et l'ensemble a été incubé à 70 °C dans un bain marie sous agitation pendant 10 min.

Quel que soit le protocole d'extraction utilisé, la suspension obtenue est déposée sur une première colonne (QIAshredder spin column), centrifugée à 10 000 rpm pendant 15 secondes. Cette étape permis de supprimer les débris végétaux. L'éluat contenant les acides nucléiques a été additionné d'éthanol, puis sur une seconde colonne (RNeasy Mini spin column). Après centrifugation 15s à 10 000 rpm, les acides nucléiques sont retenus sur la membrane de la colonne. La colonne a été lavée avec 350 µl de tampon RW1. Afin d'obtenir des ARN purs, la présence éventuelle d'ADN génomique est éliminée par traitement à la DNase I (DNaseI : 10 µl ; tampon RDD : 70 µl ; 15 min à température ambiante) directement

sur la colonne. Un second lavage a été effectué avec 350 µL de tampon RW1. Les ARN fixés à la colonne sont traités deux fois avec 500 µl du tampon de lavage RPE (10 000 rpm pendant 15 s, puis pendant 2 min pour le second lavage). La colonne a été placée dans un nouveau tube de collection puis centrifugée à vitesse maximale pendant 1 min pour la sécher et éliminer toutes traces d'éthanol. Les ARN totaux ont été enfin élués en déposant 30 µl d'eau RNase-free sur la colonne puis centrifugés à 10 000 rpm pendant 1 min. La concentration et la qualité (ratios 260/280 et 260/230) des extraits d'ARN totaux ont été déterminées par dosage au micro-spectrophotomètre (NanoDrop). L'intégrité des ARN totaux a été vérifiée au bioanalyseur (Agilent). Les ARNs ont été ensuite conservés à -80°C.

II.3. Obtention des ADNc par transcription réverse

La transcription réverse a pour but de rétrotranscrire l'ARN messager (ARNm) en ADN complémentaire (ADNc), en utilisant la transcriptase inverse. L'amorce utilisée est un oligo-dT (deoxyThymine) qui s'hybride à la queue poly-A des ARNm. Cette technique est appliquée en utilisant le kit SuperScript II Reverse transcriptase (Invitrogen). Les instructions du fournisseur ont été suivies. La réaction de transcription inverse (RT) a été réalisée à partir de 1µg d'ARN totaux traités à la DNase. Les ARN ont été dénaturés à 65 °C pendant 5 min dans un volume final de 12 µl (ajusté par addition d'eau) comprenant 0,5 µl de OligodT (10 µM), 1 µl de dNTP (dNTP 5 mM), puis plongés immédiatement dans de la glace. Le traitement à forte température permet d'éliminer les structures secondaires des ARNm. Après une brève centrifugation, 7 µl de mix (Tableau 8) ont été rajoutés aux ARN pour porter le volume total à 20 µl. Après une homogénéisation par inversion, le mélange a été incubé à 42 °C pendant 2 min. Un microlitre (1 µl) de l'enzyme SuperScript II RT (50 u) a été ajouté au mélange puis incubé à 42°C pendant 50 min. L'enzyme a été inactivée par incubation à 70°C pendant 15 min. Les ADNc obtenus ont été aliquotés puis conservés à -20°C.

Tableau 8: Composition du mix pour la transcription réverse

Composants	Quantité (µl)
Tampon RT × 5x	4
DTT	2
RNase out	1

II.4. Démarche de recherche de séquences chez *S. senegal*, *V. seyal* et *P. juliflora*

Pour réaliser la quantification de l'expression d'un gène par QPCR, il faut au préalable disposer de la séquence du ou des gènes dont on veut mesurer l'expression. Il faut aussi disposer de la séquence d'un gène de ménage qui servira de normalisateur. Notre choix a porté sur l'actine qui est un gène souvent utilisé comme normalisateur et qui est très conservé. Dans un travail préliminaire, nous avons recherché les séquences de NHX1 dans les bases de données existantes dans Genbank (<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/genbank/>) en utilisant des séquences de NHX1 connues chez d'autres espèces (*Medicago truncatula* n° XM_013613567.1; *Vigna radiata* var. *radiata* n° JN656211.1; *Glycine max* n° AY972078.1; *Atriplex halimus* n° KJ452341.1; *Arabidopsis thaliana* n° AY685183.1 et *Cicer arietinum* n° NM_001278963.1) et le logiciel Blast. Cependant, il existe peu voire pas de données génomique pour nos 3 espèces et nous n'avons pu identifier qu'une séquence partielle de NHX1 (N° accession JN629034.1) pour *P. juliflora*. Une même recherche a été effectuée avec l'actine, mais aucune séquence n'a pu être trouvée. Les séquences de l'actine de *Glycine max* (n° XM_003523194.3), *Trifolium pratense* (n° AY372368.1), *Cicer arietinum* (n° XM_012716420.1), *Pisum sativum* (n° KM401437.1), *Medicago truncatula* (XM_013595235.1), *Phaseolus vulgaris* (n° XM_007132008.1), *Vigna radiata* var. *radiata* (XM_014642227.1) et *Arabidopsis thaliana* (n° NM_112764.3) ont été utilisées. Afin de caractériser nos gènes, nous avons donc opté pour une approche par PCR utilisant des amorces dégénérées pour rechercher la séquence du gène NHX1 chez nos 3 espèces ainsi que la séquence du gène de l'actine.

II.4.1. Amplification de l'actine et de NHX1 chez *S. senegal*, *V. seyal* et *P. juliflora* par PCR avec amorces dégénérées

La PCR (de l'anglais Polymerase Chain Reaction : Réaction de Polymérisation en Chaîne en français) (Mulis et Faloona, 1987) permet l'amplification sélective *in vitro* de séquences d'acides nucléiques. Elle s'effectue en présence d'une ADN polymérase (la *Taq* polymérase) thermostable, de dNTPs (dATP, dCTP, dGTP et dTTP), de tampon, du MgCl₂ et de deux amorces spécifiques de la région d'ADN à amplifier.

Afin de dessiner des amorces de type dégénérées, nous avons tout d'abord recherché des séquences d'actine chez différentes espèces proches de nos espèces en utilisant la base de données de séquence Genbank. Des alignements multiples ont été réalisés avec le logiciel Multalin (<http://multalin.toulouse.inra.fr/multalin/>) puis des amorces ont été dessinées dans

les régions conservées. Trois amorces sens et 3 amorces antisens ont été dessinées pour l'actine. Un travail identique a été réalisé pour le gène *NHX1* et une amorce sens et 3 amorces antisens ont été dessinées.

Des réactions de PCR avec ces amorces dégénérées ont été effectuées à partir des ADNc obtenus pour nos 3 espèces. Huit combinaisons de couples d'amorces ont été testés pour l'actine et 3 couples pour le gène *NHX1* chez les trois espèces. Les tailles théoriques des séquences d'ADN obtenues avec les différents couples ont été estimées. Les amplifications ont été réalisées grâce au thermocycleur I cyclor (BioRad) dans un volume réactionnel de 25 µl contenant 0,125 µl de Taq polymérase (GoTaq), 5 µl du tampon 5X, 0,5 µl de dNTP (10 µM), 1 µl de chaque amorce et 1 µl d'ADNc. Le programme d'amplification comprend une première phase de dénaturation à 94°C pendant 3 min suivie de 30 cycles comprenant une dénaturation (94°C, 30s), une hybridation (50°C, 30s), une élongation (72°C, 45s). Une phase d'extension de 72°C pendant 7 min a été effectuée pour finir les amplifications inachevées. La température d'hybridation est volontairement choisie plus basse afin de favoriser l'accrochage des amorces.

L'amplification des gènes a été contrôlée par électrophorèse sur gel d'agarose 1 % (p/v). Quinze (15) µl du produit d'amplification ont été déposés dans chaque puits du gel d'agarose et mis à migrer pendant 30 min à 100 volts dans une cuve horizontale contenant du tampon TBE 1X. Trois (03) µl de marqueur de poids moléculaire 1 kb (Pharmacia Biotech) ont été utilisés comme référence de taille des produits de PCR. Après la migration, le gel a été coloré par immersion pendant 20 min dans une solution de Bromure d'éthidium (BET), puis rincé à l'eau déminéralisée pendant 20 min. Le gel a été ensuite placé sur un transilluminateur UV pour visualiser les bandes d'ADN et photographié à l'aide du système Gel Doc 1000 (BIORAD). Les couples d'amorces qui ont permis l'amplification de fragments d'ADN avec des tailles proches de celles théoriques ont été sélectionnés. Des PCR grand volume (100 µl) ont alors été effectuées pour permettre de purifier les fragments d'ADN amplifiés.

II.4.2. Purification, clonage et séquençage

Seuls les produits PCR qui ont les tailles proches de celles théoriques ont été choisis. Les produits PCR ont été purifiés avec le kit GeneClean Turbo. Pour les couples d'amorces qui ont donné plus d'une bande (tel que F2/R2 de l'actine), celle qui a la taille la plus proche de celle théorique a été découpée sous UV et la purification a alors été réalisée à partir du gel. Cinq (05) volumes de GeneClean Turbo Salt solution ont été ajoutés au produit PCR. Pour les

bandes coupées, 100 µl ont été ajoutés par 0,1 g de gel. Le mélange (ADN + solution de GeneClean) a été transféré dans des filtres placées sur des tubes puis centrifugé 10 000 rpm pendant 5 s. Ensuite 500 µl de GeneClean Turbo wash solution ont été ajoutés sur le filtre puis centrifugé comme précédemment. Une centrifugation de 10 000 rpm pendant 4 min a été effectuée pour éliminer les résidus de la solution de lavage. L'élution de l'ADN a été effectuée avec 15 µl de GeneClean Turbo Elution solution par incubation à température ambiante (environ 25 °C) pendant 5 min puis par centrifugation à 10 000 rpm pendant 1 min. La ligation du produit de PCR purifié a été réalisée avec 1 µl du vecteur pGEM-T Easy, 5 µl du tampon 2x, 1 µl ligase et 3 µl de l'insert (produit PCR). Le mélange a été incubé à 12°C pendant 14 h. Pour la transformation bactérienne, 50 µl de cellules ultracompetentes X-2 blue ont été ajoutés à 5 µl du produit de ligation. Après une incubation de 30 min dans de la glace, le mélange a été incubé à 42 °C pendant 1 min. Ensuite, 300 µl de SOC medium ont été rajoutés au mélange puis incubé à 37°C pendant 1h. Cent (100) microlitres ont été déposés sur du milieu LB solide contenant de l'IPTG (0,5 mM), de X-Gal (10 µg/ml) et de l'ampicilline 100 mg/ml. Après une incubation de 16 heures à 37°C, des suspensions bactériennes ont été préparées avec les colonies blanches. Après éclatement des cellules, une PCR a été effectuée sur les avec les amorces M13-F (GTTTTCCCAGTCACGAC) et M13-R (CAGGAAACAGCTATGAC) et le même programme d'amplification. Quatre répétitions ont été effectuées par échantillon. Après contrôle de la PCR, seuls les échantillons qui ont donné les tailles attendues ont été retenus. Une Minipreps a été réalisée pour extraire et purifier l'ADN plasmidique selon le protocole décrit dans le kit Wizard Minipreps DNA purification System. Les échantillons ont été envoyés à Genoscreen (France) pour le séquençage.

II.5. Test de l'efficacité des amorces pour qPCR

La PCR-quantitative ou qPCR est basé sur la technique de PCR. Le principe est le même à savoir amplifier une séquence spécifique d'ADN, mais l'amplification sera mesurée en temps réel grâce à l'utilisation d'une molécule fluorescente, qui va permettre d'évaluer le niveau d'amplification en mesurant le niveau de fluorescence. Dans notre cas, le marqueur fluorescent choisi est le SYBR Green qui présente l'avantage d'être peu coûteux et facile à mettre en œuvre. Parmi les différentes techniques de qPCR décrites (Gizinger, 2002), nous avons choisi d'utiliser une méthode de quantification relative. Cette méthode implique de sélectionner un gène normalisateur dont l'expression doit être stable entre les conditions

biologiques comparées ainsi qu'une condition biologique témoin par rapport à laquelle l'expression du gène d'intérêt sera mesuré dans les différentes conditions expérimentales. Des amorces qPCR spécifiques ont été conçues par le logiciel Beacon Designer (Premier Biosoft International, Etats-Unis). Les tests ont été réalisés avec les amocres de l'actine et du gène NHX1 chez *P. juliflora* (Tableau 9).

Tableau 9: Amorces qPCR de l'actine et du gène NHX1 chez *P. juliflora*

Codes	Séquences	Tailles
NHX1PJ_QF1	5'- ACATCTGTAGTGCTCTTGAA -3'	20
NHX1PJ_QR1	5'- GTGCTTGCTGTAAATAAGTAGA -3'	22
Actin_PJ_QF1	5'- CAGCAGTGGAGAAGAGTTA -3'	19
Actin_PJ_QR13	5'- ATGATGGAGTTGTAGGTAGTT -3'	21

Les ADNc ont servi de matrice pour la qPCR. La qPCR est réalisée en utilisant le Brilliant III Ultra-Fast SYBR Green qPCR Master Mix (Agilent) dans un volume total de 15 µL (3µL d'ADNc (soit 0,5ng), 2,25 µL de chaque amorce (300 nM final) et 7,5 µL de mix) avec le programme PCR adapté [95 °C, 5 min - (40 cycles) 95 °C, 10 s - 60° C, 30s - 95°C, 1 min - 60°C, 30s - 95°C, 30s] sur un thermocycler MX 3500P (Agilent). Chaque échantillon est déposé en trois répliquats et des témoins négatifs sans ADNc sont réalisés. Les concentrations optimales sont déterminées pour chaque couple d'amorces et leur efficacité est déterminée. Pour chaque expérience, une courbe de dissociation est réalisée à la fin du programme PCR afin de vérifier la spécificité du produit (Gizinger, 2002).

III. Résultats

III.1. Obtention d'ARN de feuilles et racines pour *S. senegal*, *V. seyal* et *P. juliflora*

Les résultats ont montré que tous les protocoles testés permettent d'extraire les ARN totaux des feuilles et racines de *S. senegal*, *V. seyal* et *P. juliflora*. La figure 4 montre un exemple représentatif de spectre d'absorbance obtenu pour des échantillons de feuilles et racines de *S. senegal*. La figure 5 montre un exemple de profil électrophorétique obtenu lors de la vérification de l'intégrité des ARN au Bioanalyzeur (Agilent).

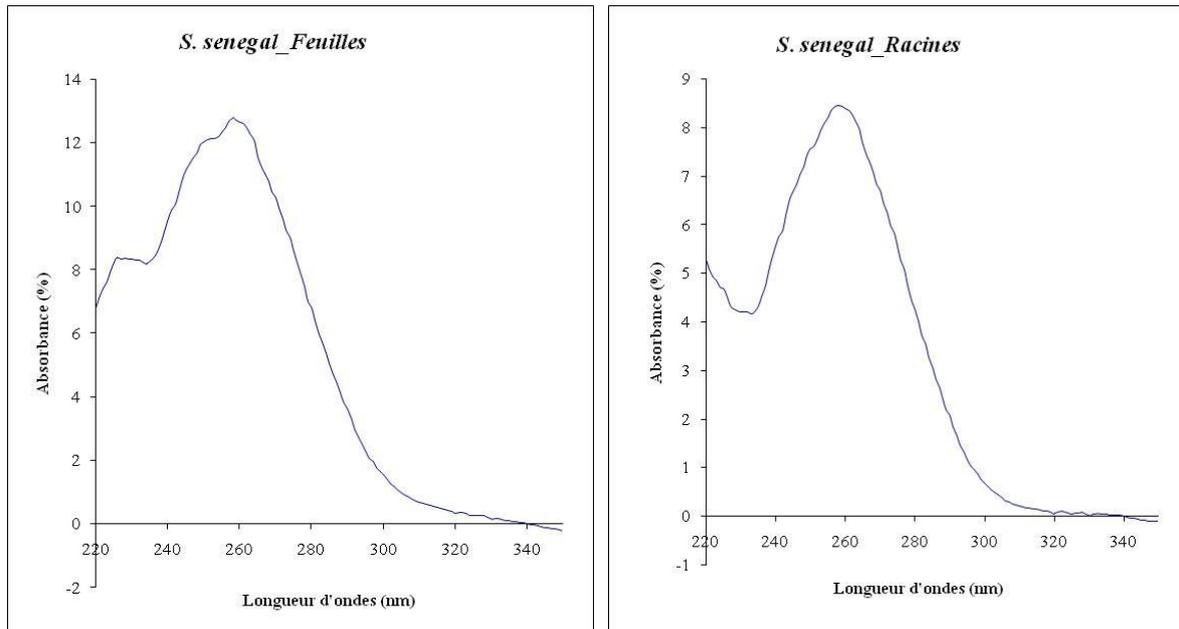


Figure 4 : Absorbance des ARN totaux après traitement à la DNase

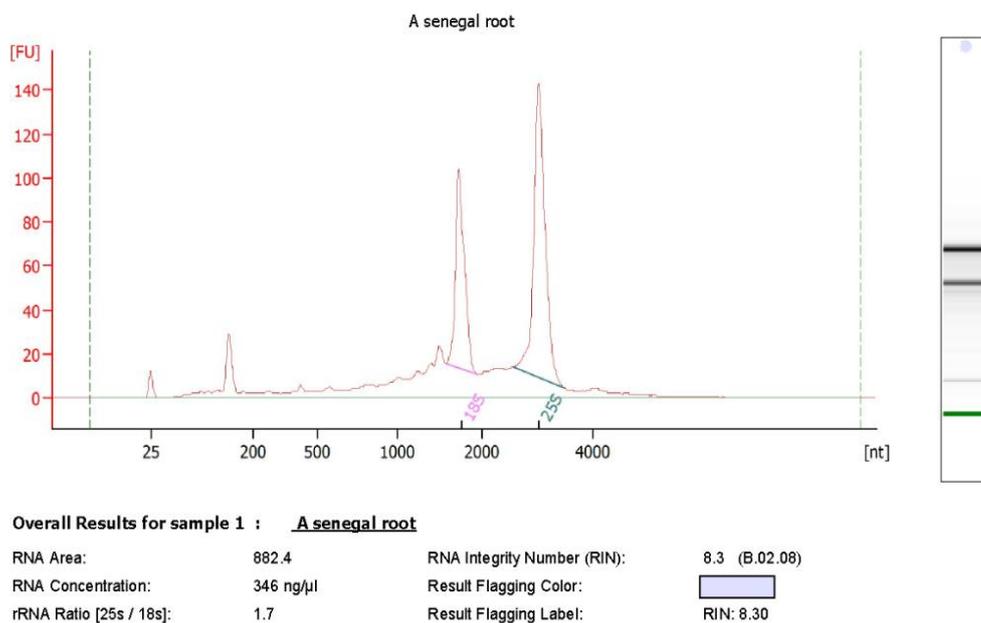


Figure 5 : Exemple de profil électrophorétique obtenu après analyse d'un échantillon d'ARN de racine de *S. senegal*.

Les pics correspondent aux ARN ribosomiques 18S et 28S. C'est leur qualité qui est évaluée et estimée à l'aide du RIN (RNA Integrity Number). Un échantillon de bonne qualité doit avoir un RIN supérieur à 6.

Les résultats montrent une bonne intégrité des régions 18S et 28S avec un RIN compris entre 5,4 et 8,5. Toutefois, le protocole 3 a permis d'obtenir les meilleurs résultats en termes de quantité, de pureté et de qualité avec de bons ratios (Tableau 10).

Tableau 10 : Rendement en ARN totaux, ratios et RIN obtenus pour les différents échantillons d'ARN

Espèces/organes	Concentration (ng/µl)	260/280	260/230	Quantité (µg)	RIN
<i>S. senegal</i> _Feuilles	505,41	1,86	1,52	25,27	5,40
<i>S. senegal</i> _Racines	335,12	1,97	1,99	16,76	8,30
<i>V. seyal</i> _Feuilles	474,09	2,12	2,25	23,70	7,20
<i>V. seyal</i> _Racines	477,39	1,99	2,09	23,87	7,40
<i>P. juliflora</i> _Feuilles	306,63	1,98	2,23	15,33	6,30
<i>P. juliflora</i> _Racines	372,74	1,96	2,00	18,64	7,30

RIN = RNA Integrity Number

III.2. Amplification de l'actine et du gène NHX1 chez *S. senegal*, *V. seyal* et *P. juliflora*

III.2.1. L'actine

Le tableau 11 présente les amorces dégénérées utilisées pour l'amplification de l'actine. La position de ces amorces est indiquée dans l'annexe 4.

Tableau 11 : Amorces dégénérées utilisées pour amplifier l'actine chez les trois espèces

Codes	Séquences	Tailles	Tm (°C)
<i>ActinDF-F1</i>	5'-ATGACCCAAATYATGTTYGAGACC- 3'	24	61,8
<i>ActinDF-F2</i>	5'-ACAACYGGTATTGTBYTGGAYTCTGG- 3'	26	62,7
<i>ActinDF-F3</i>	5'-TTAAAGCTGGATTTGCTGGAGAYGAYGNCC- 3'	30	68,8
<i>ActinDF-R1</i>	5'-CRAGRATKCCHGCAGCTTCCATTCC- 3'	25	66,0
<i>ActinDF-R2</i>	5'-CCRATCCARACACTGTACTTYCTC- 3'	24	61,9
<i>ActinDF-R3</i>	5'-CAGTAGTAGTAAACATAT- 3'	18	66,9

Y = T, C; **B** = G, T, C; **N** = G, A, T, C; **R** = G, A; **K** = G, T; **H** = A, T, C;
S = G, C; **D** = G, A, T; **W** = A, T; **V** = G, A, C; **M** = A, C

Sur les huit couples testés, cinq (F1/R1, F1/R2, F2/R2, F3/R1 et F3/R2) ont permis d'amplifier des fragments d'ADN avec des tailles différentes (Fig. 6). Les couples F1/R1, F1/R2, F3/R1 et F3/R2 ont produit des amplicons respectifs d'environ de 500 pb, 600 pb, 600 pb, 800 pb et 1000 pb. Le couple F2/R2 a produit 2 amplicons d'environ de 550 pb et 700 pb. Aucune amplification n'a été obtenue avec les couples F1/R3, F2/R3 et F3/ pour toutes les espèces.

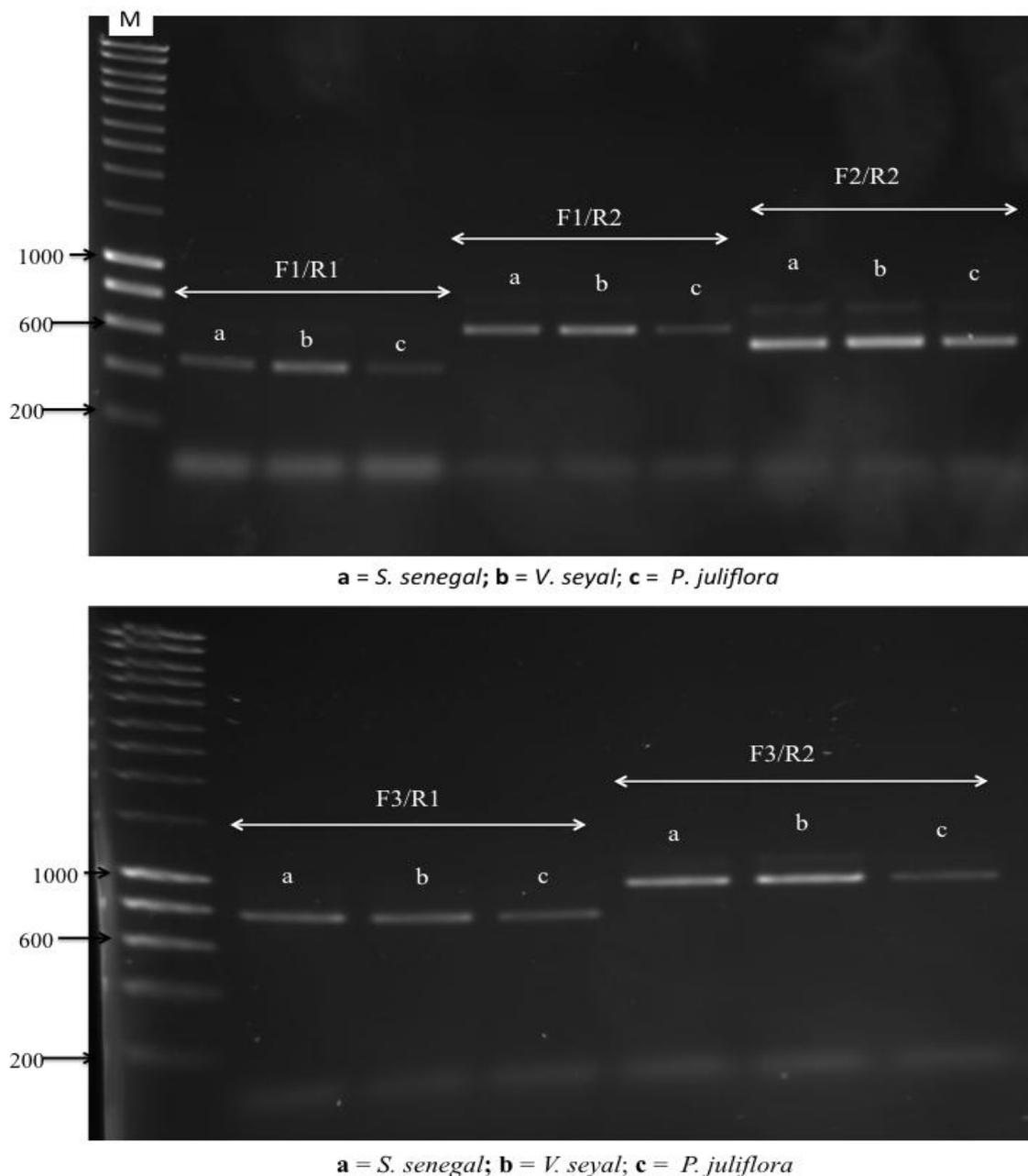


Figure 6 : Electrophorèse sur gel d'agarose des produits de PCR obtenus après amplification avec les couples d'amorces dégénérées actine.

Afin de vérifier si les fragments amplifiés correspondent à l'actine, le séquençage a été effectué. Les séquences obtenues sont présentées en annexe et correspondent bien à celle de l'actine après vérification avec le logiciel Blast.

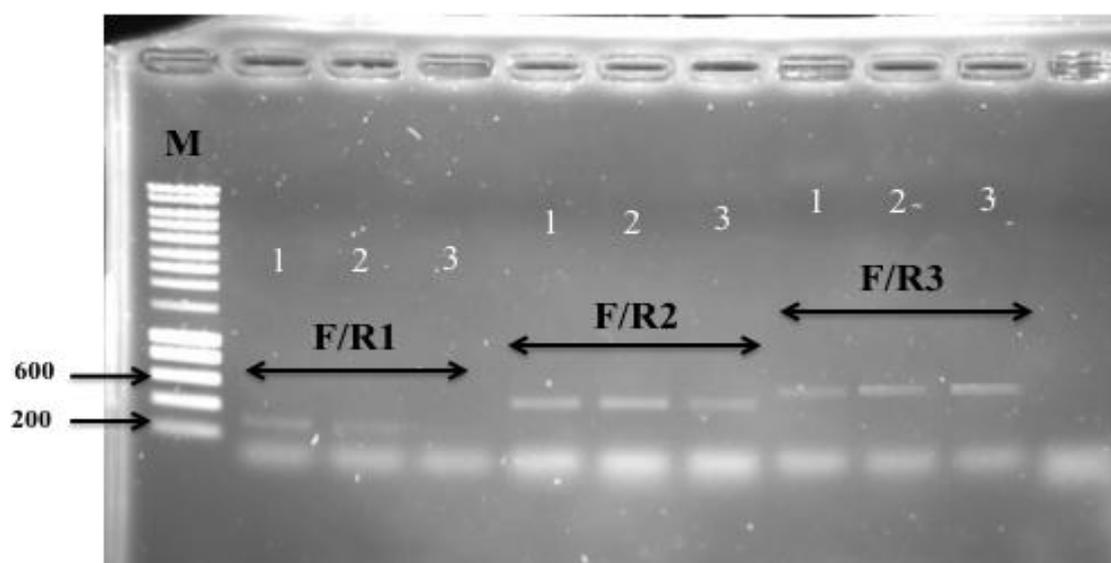
III.2.2. Le gène *NHX1*

Le tableau 12 montre les amorces dégénérées pour amplifier le gène *NHX1* chez les 3 espèces. Les couples d'amorces *NHX1F/NHX1R1*, *NHX1F/NHX1R2* et *NHX1F/NHX1R3* ont permis d'amplifier des fragments d'ADN avec la taille attendue d'environ 300 pb, 500 pb et 600 pb, respectivement (Fig. 7). Aucune différence en termes de taille de l'amplicon n'a été observée avec le même couple d'amorce.

Tableau 12 : Amorces dégénérées utilisées pour amplifier le gène *NHX1* chez les trois espèces

Codes	Séquences	Tailles	Tm (°C)
<i>NHX1F</i>	5'-TTYAATGCHGGSTTTCARG-3'	19	53,1
<i>NHX1R1</i>	5'-GABGTDGCATCATTHACAACWCC-3'	23	59,4
<i>NHX1R2</i>	5'-ACCTCDCGATCWGTNGARTGC-3'	21	60,5
<i>NHX1R3</i>	5'-TGRGACRTVACAATMCCAC-3'	19	54,9

Y = T, C; **B** = G, T, C; **N** = G, A, T, C; **R** = G, A; **K** = G, T; **H** = A, T, C;
S = G, C; **D** = G, A, T; **W** = A, T; **V** = G, A, C; **M** = A, C



1 = *S. senegal*; 2 = *V. seyal*; 3 = *P. juliflora*

Figure 7 : Electrophorèse sur gel d'agarose des produits de PCR obtenus après amplification avec les couples d'amorces dégénérées *NHX1*.

III.3. Efficacité des amorces qPCR chez *P. juliflora*

Les figures 8 et 9 montrent les courbes d'amplification et de dissociation de l'actine et du gène NHX1 chez *P. juliflora*. Les amorces dessinées montrent une bonne efficacité avec 102% et 100% respectivement pour l'actine et NHX1. Ces résultats montrent que les ADNc et les amorces dessinées peuvent être utilisés pour faire une qPCR.

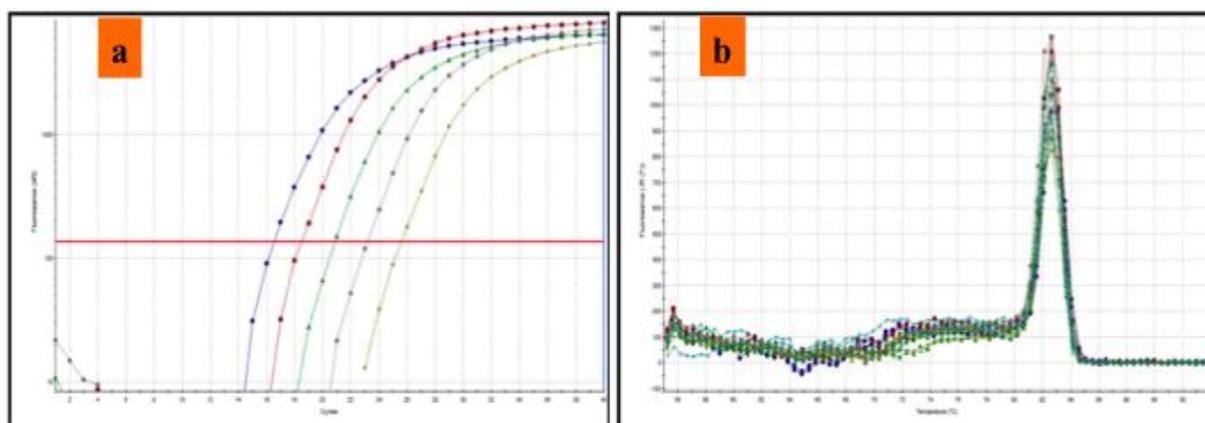


Figure 8 : Courbes d'amplification (a) et de dissociation (b) de l'actine chez *P. juliflora*

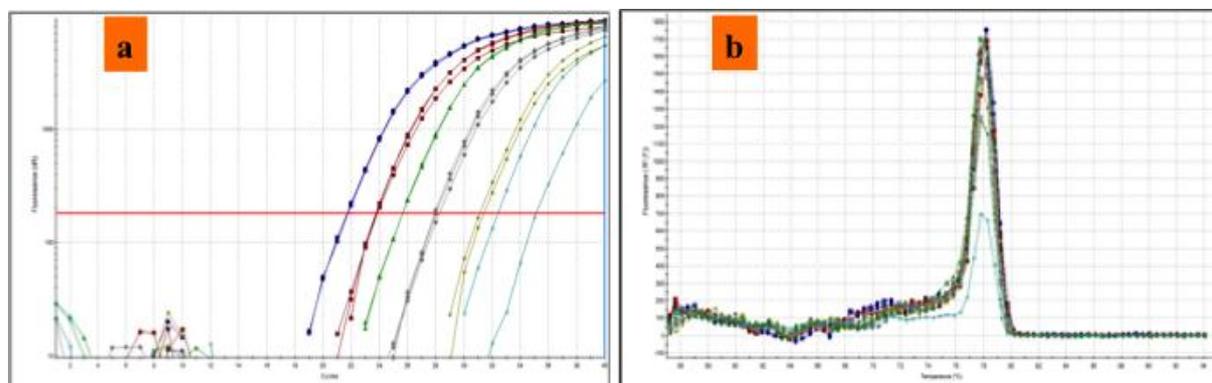


Figure 9 : Courbes d'amplification (a) et de dissociation (b) de *NHX1* chez *P. juliflora*

IV. Discussion, conclusion et perspectives

A notre connaissance, aucune étude n'a été effectuée sur les mécanismes moléculaires de tolérance à la salinité chez *S. senegal* et *V. seyal*. Nos résultats préliminaires sur les études moléculaires ont d'abord permis de mettre au point des séquences partielles de l'actine chez les trois espèces. Ils ont également montré la présence du gène *NHX1* (antiport vacuolaire

Na⁺/H⁺) chez *S. senegal*, *V. seyal* et *P. juliflora*. En effet, des études ont montré que la surexpression du gène *NHX1* chez des plants cultivés en conditions salines améliore leur tolérance à la salinité (Gouiaa et al., 2012; Baltierra et al., 2013; Hasegawa, 2013; Panahi et al., 2013; Hu et Wu, 2014; Chen et al., 2015).

La présence du gène *NHX1* témoigne de la capacité de ces espèces à séquestrer les ions Na⁺ dans la vacuole ; ce qui leur permettrait de se développer dans des milieux salés.

Les études moléculaires devront être effectuées pour compléter celles physiologiques. Ainsi, l'expression de gènes impliqués dans la tolérance à la salinité tels que *NHX1*, *SOS1*, *HKT1*,... devra être évaluée chez ces espèces dans différentes conditions salines.

CHAPITRE III : Détermination de la dose de coques d'arachide pour améliorer la croissance de *Senegalia senegal* (L) Britton, *Vachellia seyal* (Delile) P. Hurter et *Prosopis juliflora* (Swartz) DC en conditions salines et la fertilité des sols salés

Chapitre III: Détermination de la dose de coques d'arachide pour améliorer la croissance de *Senegalia senegal* (L) Britton, *Vachellia seyal* (Delile) P. Hurter et *Prosopis juliflora* (Swartz) DC en conditions salines et la fertilité des sols salés

Avant-propos

Ce chapitre a fait l'objet d'un article qui sera soumis dans *Journal of Soil and Water Conservation*.

Fall D., Bakhoun N., Fall F., Diouf F., Diouf D. **The reuse of peanut shells for restoration of chemical characteristics of salt-affected soils and improvement of trees growth in greenhouse conditions**

Abstract

Salinization causes degradation of biological, chemical and physical properties of soils particularly fertility, which leads to the decrease of crops yield and the degradation of forest ecosystems. Salty soils reclamation can be achieved with agro-biological methods, such as organic amendments and afforestation with salt tolerant species. Thus, our work aimed to contribute to the restoration of saline soils in the central part of Senegal by agro-biological tools. Experiments were achieved to assess the effect of peanut shells on *Senegalia senegal* (L.) Britton, *Vachellia seyal* (Delile) P. Hurter and *Prosopis juliflora* (Swartz) DC growth in saline conditions and soils characteristics. Seedlings were individually cultivated in plastic bags containing a mixture of non saline soil from Sadioga (Senegal peanut Basin) and crushed peanut shells. Four doses of peanut shells (0, 4, 6, 8 t/ha) of the variety 73-33 were tested. Salt stress was gradually applied (to avoid osmotic shock) after one month of culture at a rate of 2,5 g/l NaCl per day until concentrations of 0, 5, 10, 15 g/l NaCl were reached. After 3 months of salt stress, analysis of variance showed that peanut shells application improved seedlings growth (height, collar diameter, shoots and root biomass), physiological responses (chlorophyll and proline contents) and soil chemical properties (carbon, nitrogen, phosphorus contents, pH, total microbial activity, exchangeable cations and capacity of exchangeable cation) and reduced soil electrical conductivity. Four tons per hectare of peanut shells increased nodulation and mycorrhization of seedlings, while 6 and 8 T/ha reduced. In presence of high concentrations of NaCl (257 mM), the high dose of peanut shells (8 T/ha) reduced seedlings growth. Our results showed that organic amendments with peanut shells improve plants growth under saline conditions and salty soils fertility. Nevertheless, long-term field trials are needed to confirm our findings.

Keywords: Organic amendment, saline soils reclamation, *Senegalia senegal*, *Vachellia seyal*, *Prosopis juliflora*

I. Introduction

La salinisation des sols est l'un des principaux facteurs qui contribuent à la dégradation des terres et à la diminution de la productivité des plantes (Anjum *et al.*, 2005). Les sols affectés par la salinité sont caractérisés par de fortes concentrations de sels solubles (Na, K, Ca, Mg, CO₃, HCO₃, Cl, SO₄) et une faible teneur en matière organique et en azote (Asmalodhi *et al.*, 2009). Le NaCl, sel prédominant dans les sols salés, est une petite molécule qui, lorsqu'elle est hydrolysée, produit des ions chlorure (Cl⁻) et sodium (Na⁺). Ces ions toxiques à grande concentration, provoquent un stress ionique et osmotique au niveau cellulaire chez les plantes, en particulier chez les espèces sensibles ou glycophytes (Mansour et Salama, 2000; Chinnusamy *et al.*, 2005).

Les effets négatifs de la salinisation sont amplifiés par les faibles teneurs en matière organique du sol (Muhammad *et al.*, 2005) et la diminution de la stabilité de la structure du sol (taux d'infiltration faible, mauvaise aération, dispersion des particules...) (Qadir et Schubert, 2002). La salinité affecte également les propriétés chimiques du sol tels que le pH, la capacité d'échange cationique (CEC), le pourcentage de sodium échangeable (PSE), le carbone organique et les éléments nutritifs disponibles (Sumner, 2000).

Il existe plusieurs technologies efficaces pour améliorer la qualité des sols salés tels que le lessivage de l'eau, les amendements chimiques et la phytoremédiation (Ahmad et Chang, 2002; Sharma et Minhas, 2005; Qadir *et al.*, 2007). La remédiation des sols salés avec des agents chimiques tels que le gypse (CaSO₄, 2H₂O), le calcite (CaCO₃), le chlorure de calcium (CaCl₂ 2H₂O) et la matière organique (amendement organique, fumier, déchets ménagers, ...), est une technologie efficace, simple et à moindre coût qui est largement utilisée (Mitchell *et al.*, 2000; Hanay *et al.*, 2004; Sharma et Minhas, 2005; Tejada *et al.*, 2006). Les propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol dans les zones affectées par le sel peuvent être améliorées par l'application de la matière organique (MO), conduisant à une amélioration de la croissance et de la productivité des plantes. Il est également important de noter que l'application de la MO pour restaurer la fertilité des sols salés est nécessaire pour une utilisation durable des terres et une productivité des cultures (Choudhary *et al.*, 2004; Wong *et al.*, 2009). Plusieurs types de matières organiques tels que le fumier de volaille (Tejada *et al.*, 2006), de porc (Liang *et al.*, 2003), le compost de coton (Tejada *et al.*, 2006), de paille de riz, les coques d'arachide (PROGERT, 2006, 2007 et 2008) sont utilisés pour améliorer la qualité et la croissance des plants sur sols salés.

Au Sénégal, la culture de l'arachide est la plus importante activité agricole et représente environ 40% des terres cultivées. Une énorme quantité de coques d'arachide est produite chaque année à travers le pays et est généralement peu valorisée. Les coques d'arachide sont parfois utilisées traditionnellement comme matière organique par les riziculteurs pour restaurer leurs rizières affectées par la salinité. Bien que l'effet des coques d'arachide sur l'amélioration de la qualité du sol et l'augmentation des rendements du mil et du maïs sur les sols salés, ait été obtenu par les agriculteurs, ses effets sur les propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols restent méconnus. De même, les effets des coques d'arachide sur la croissance des espèces ligneuses susceptibles d'être utilisées dans la réhabilitation des sols salés sont très peu documentés.

Ainsi, ce troisième chapitre de notre thèse a pour objectif d'évaluer l'effet de l'apport des coques d'arachide sur la croissance de *Senegalia senegal*, *Vachellia seyal* et *Prosopis juliflora* et sur les caractéristiques chimiques et microbiologiques des sols salés en conditions contrôlées.

II. Matériel et méthodes

II.1. Préparation du substrat de culture

Le substrat de croissance a été constitué d'un mélange de sol non stérile de Sadioga (voir Tableau 3 du chapitre II) et de coques d'arachide. La variété d'arachide 73-33 a été utilisée et ses caractéristiques chimiques sont présentées dans le tableau 13. Le choix de cette variété est lié au fait qu'elle est la plus cultivée dans le sud du Bassin arachidier, notamment dans les régions de Fatick et de Kaolack où la salinisation des terres est plus importante.

Tableau 13 : Caractéristiques chimiques des coques d'arachide de la variété 73-33

N total (%)	C total (%)	C/N	P total (mg/kg)	Ca (g/kg)	K (g/kg)	Na (g/kg)	Cl (g/kg)
1,00	46,24	46	610	6,9	4,7	2,6	4,7

Les coques ont été broyées pour accélérer leur décomposition par les microorganismes du sol. Quatre doses (0, 4, 6 et 8 T/ha) ont été testées. Pour chaque dose, la quantité de sol à rajouter a été évaluée en tenant compte du volume des gaines (25 cm × 12 cm).



Planche photographique 12 : Préparation du substrat de croissance des plants

II.2. Culture des plants et application du stress salin

Les graines, scarifiées et prégermées comme décrit dans le chapitre II, ont été repiquées dans des gaines (12 cm x 25 cm) contenant le substrat de culture. Pour chaque espèce, deux facteurs ont été étudiés : le facteur coques d'arachide avec quatre niveaux (0, 4, 6, 8 T/ha) et le facteur salinité avec quatre niveaux (0, 5, 10, 15 g/l NaCl). Ces concentrations ont été choisies en fonction des taux de germination (environ 100%) et de la salinité des zones du Sine Saloum susceptibles d'être restaurées par voie biologiques. Pour chaque espèce, un dispositif en blocs complets randomisés avec 16 traitements (4 x 4) et 10 répétitions par traitement a été effectué. Ainsi, pour chaque espèce, 160 unités expérimentales (16 x 10) ont été étudiées. L'application du stress salin et l'arrosage des plants ont été effectués comme décrit précédemment dans le chapitre II.

Après 4 mois de culture, les paramètres de croissance (hauteur, diamètre au collet, biomasses aérienne et racinaires), physiologiques (teneur relative en eau et potentiel hydrique) ont été évalués comme décrit dans le chapitre II. Le nombre de nodosités et l'intensité de mycorhization ont été évalués. Pour l'intensité de mycorhization, les racines ont été soigneusement rincées à l'eau de robinet afin d'éliminer les particules de sol. Une solution de KOH 10% a été ajoutée aux racines placées dans des tubes à essai pour les décolorer et vider les cellules de leur contenu cytoplasmique. Les tubes ont été ensuite portés à ébullition dans un bain marie bouillant pendant 1h. Les racines ont été abondamment rincées par la suite pour

éliminer le KOH puis colorées au bleu de Trypan selon la méthode de Philips et Hayman (1970). L'intensité de mycorhization a été évaluée au microscope optique comme décrit par Trouvelot *et al.* (1986).

II.3. Evaluation de l'effet des coques d'arachide sur les caractéristiques des sols salés

Cette étude a été effectuée sur les échantillons de sols après les 4 mois de culture des plants de *S. senegal*. Pour chaque traitement, trois répétitions ont été effectuées. Les caractéristiques chimiques (pH, conductivité électrique, salinité, N, C, P total, cations échangeables, capacité d'échange cationique, pourcentage de saturation) et microbiologiques (activité microbienne totale et densité des spores endomycorhiziennes) ont été évaluées. Les caractéristiques chimiques ont été évaluées au Laboratoire des Moyens Analytiques (LAMA, certifié ISO 9001) de l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD) de Dakar (Sénégal). L'hydrolyse de la Fluorescein Diacétate (FDA), largement utilisée pour évaluer l'activité microbienne totale du sol (Schnürer et Rosswall, 1982; Adam et Duncan, 2001; Nannipieri *et al.*, 2003) a été déterminée par la méthode de Adam et Duncan (2001). Les spores des champignons endomycorhiziens ont été extraites à partir de 100 g de sol selon la méthode décrite par Gerdemann et Nicolson (1963).

II.4. Analyse statistique des données

Les données ont été soumises à une analyse de variance ANOVA à un facteur. Les comparaisons entre les différentes moyennes ont été effectuées par le test de Newman-Keuls à 5% de probabilité. Les données exprimées en pourcentage ont été transformées en arc sinus avant d'être soumises à une analyse ANOVA. Une analyse en composantes principales a été effectuée pour déterminer les corrélations entre les doses de coques d'arachide, la salinité et les variables mesurées. Les analyses ont été réalisées avec le logiciel XLSTAT version 2010.

III. Résultats

III.1. Effet des coques d'arachide sur la croissance des plants en conditions salines

L'analyse ANOVA des résultats obtenus montre que la salinité ainsi que les coques d'arachide ont des effets significatifs sur la hauteur et les biomasses aérienne et racinaire sèches des plants de *S. senegal* et *V. seyal* (Tableau 14). La salinité a un effet négatif tandis que les coques d'arachide ont un effet positif sur ces paramètres. L'interaction entre la salinité et les coques d'arachide a un effet significatif sur la hauteur et la biomasse aérienne sèche des plants. Par contre, la salinité de même que l'interaction salinité et coques d'arachide n'ont aucun effet significatif sur le diamètre au collet des trois espèces. Aucun effet significatif de la salinité n'a été noté sur la hauteur des plants de *P. juliflora*.

Tableau 14 : Test de significativité des effets de la salinité, des coques d'arachide et de leur interaction sur la hauteur, le diamètre au collet, les biomasses aérienne et racinaire sèches des plants de *S. senegal*, *V. seyal* et *P. juliflora* cultivés en pépinière pendant 4 mois sur du sol non stérile

Espèces	Facteurs	Hauteur	Diam. col.	BAS	BRS
<i>S. senegal</i>	Salinité	S (P<0,0001)	NS (P=0,892)	S (P<0,0001)	S (P<0,0001)
	Coques d'arachide	S (P<0,0001)	S (P<0,0001)	S (P<0,0001)	S (P=0,000)
	Salinité *Coques	S (P<0,0001)	NS (P=0,165)	S (P<0,0001)	NS (P=0,138)
<i>V. seyal</i>	Salinité	S (P=0,016)	NS (P=0,255)	S (P<0,0001)	S (P=0,001)
	Coques d'arachide	S (P<0,0001)	S (P<0,0001)	S (P<0,0001)	S (P<0,0001)
	Salinité *Coques	S (P=0,043)	NS (P=0,274)	S (P<0,0001)	S (P=0,009)
<i>P. juliflora</i>	Salinité	NS (P=0,273)	NS (P=0,331)	S (P=0,000)	S (P=0,000)
	Coques d'arachide	S (P<0,0001)	S (P<0,0001)	S (P<0,0001)	S (P<0,0001)
	Salinité *Coques	S (P<0,0001)	NS (P=0,366)	S (P=0,002)	NS (P=0,211)

S = Significatif ; NS = non significatif au seuil de 5 % selon le test de Student-Newman-Keuls

Les données de la salinité correspondent à la combinaison de toutes les doses de coques d'arachide.

Les données des coques d'arachide correspondent à la combinaison de toutes les doses de NaCl.

Les effets individuels de la salinité et des coques d'arachide sont consignés sur les figures 10, 11 et 12. Les résultats ont montré que la salinité réduit la croissance (hauteur, diamètre au collet, biomasses aérienne et racinaire sèche) des plants de *S. senegal*, *V. seyal* et *P. juliflora*.

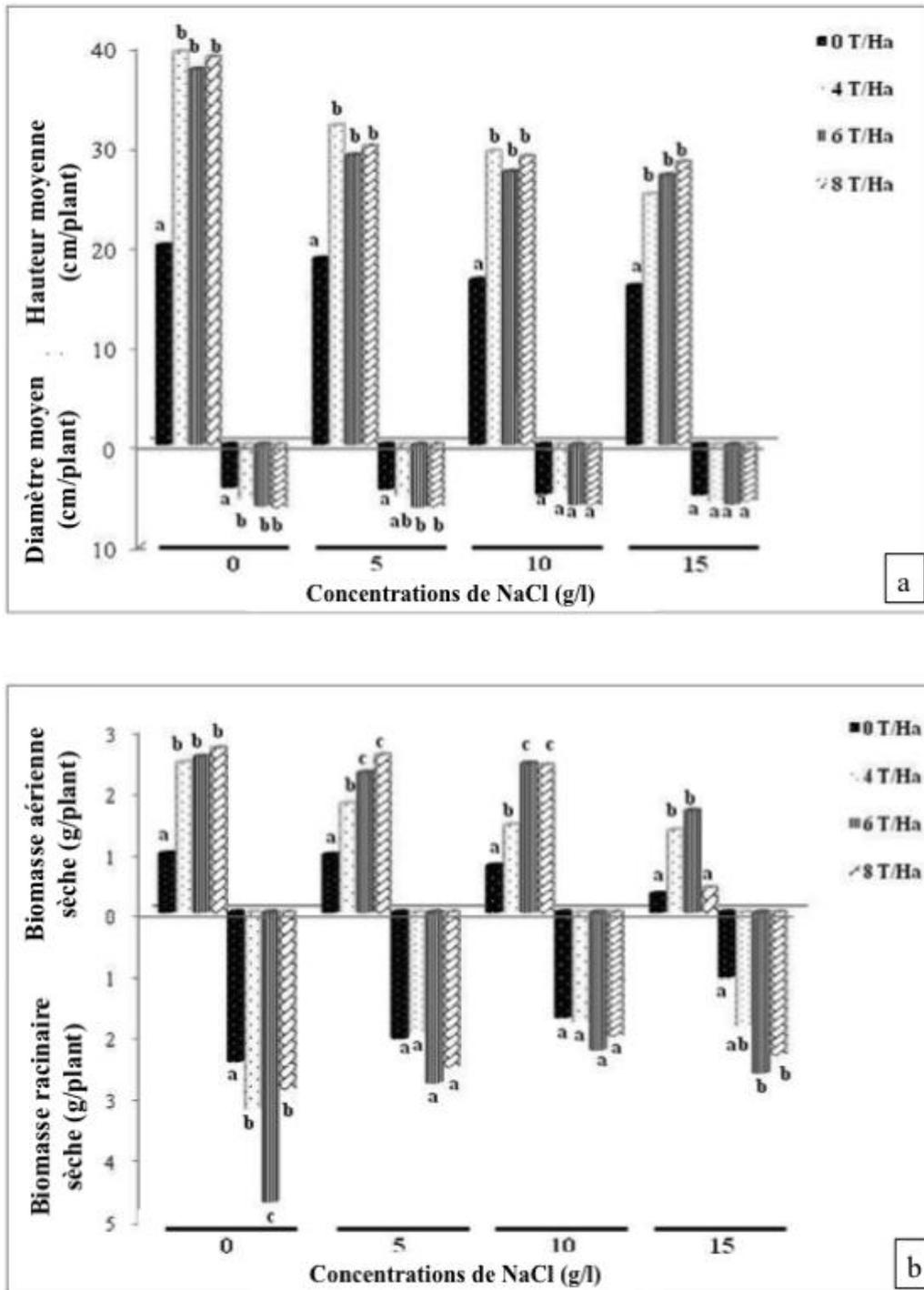


Figure 10 : Diamètre au collet, hauteur (a), biomasses aérienne et racinaire sèches (b) des plants de *S. senegal* cultivés pendant 4 mois en serre sous 4 conditions salines (0, 5, 10 et 15 g/l NaCl) sur du sol amendé avec des coques d'arachide (0, 4, 6 et 8 T/ha).

Pour chaque concentration de NaCl, les barres suivies par les mêmes lettres ne sont pas significativement différentes au seuil de 5% selon le test de Newmann et Keuls

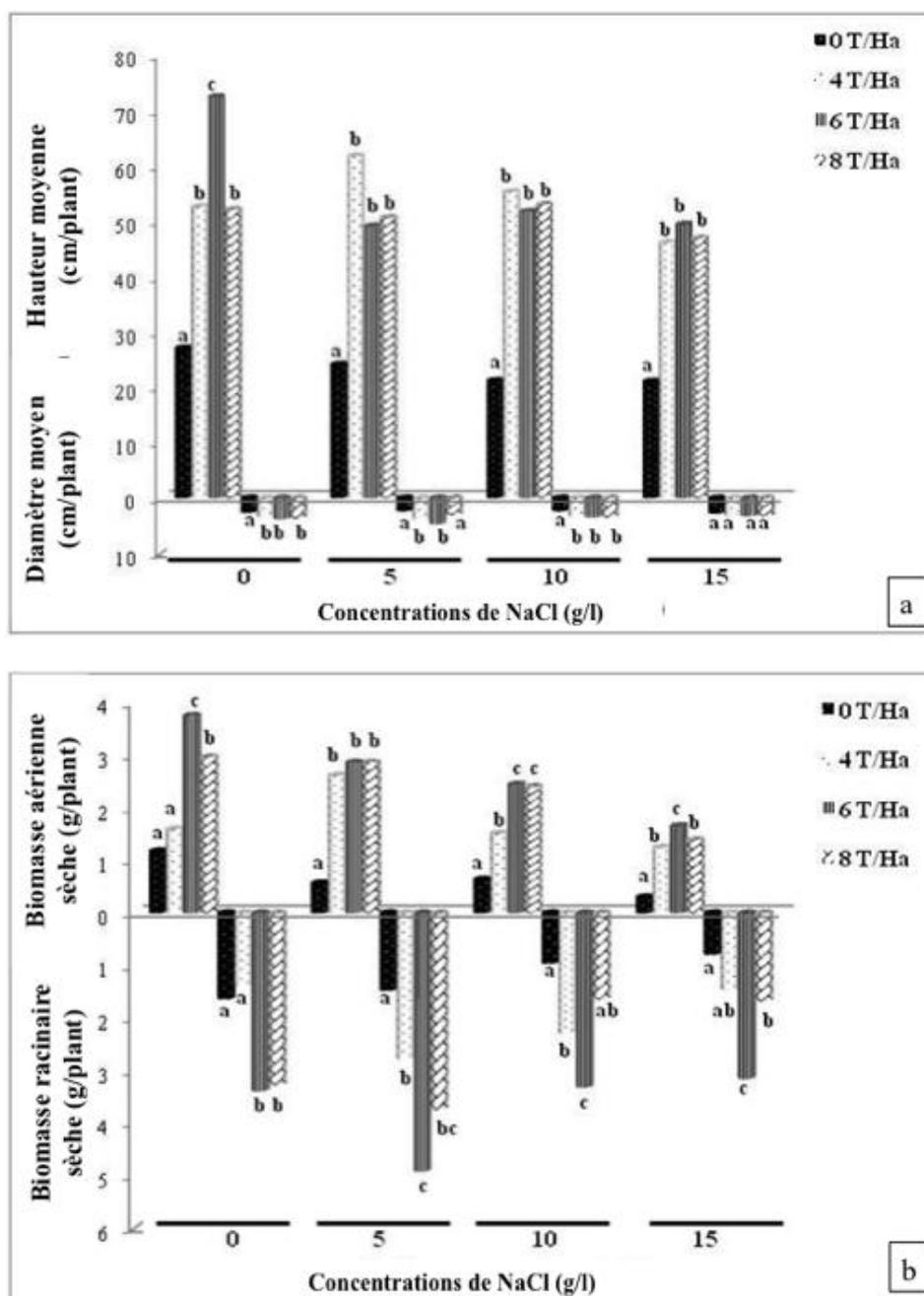


Figure 11 : Diamètre au collet, hauteur (a), biomasses aérienne et racinaire sèches (b) des plants de *V. seyal* cultivés pendant 4 mois en serre sous 4 conditions salines (0, 5, 10 et 15 g/l NaCl) sur du sol amendé avec des coques d'arachide (0, 4, 6 et 8 T/ha)

Pour chaque concentration de NaCl, les barres suivies par les mêmes lettres ne sont pas significativement différentes au seuil de 5% selon le test de Newmann et Keuls

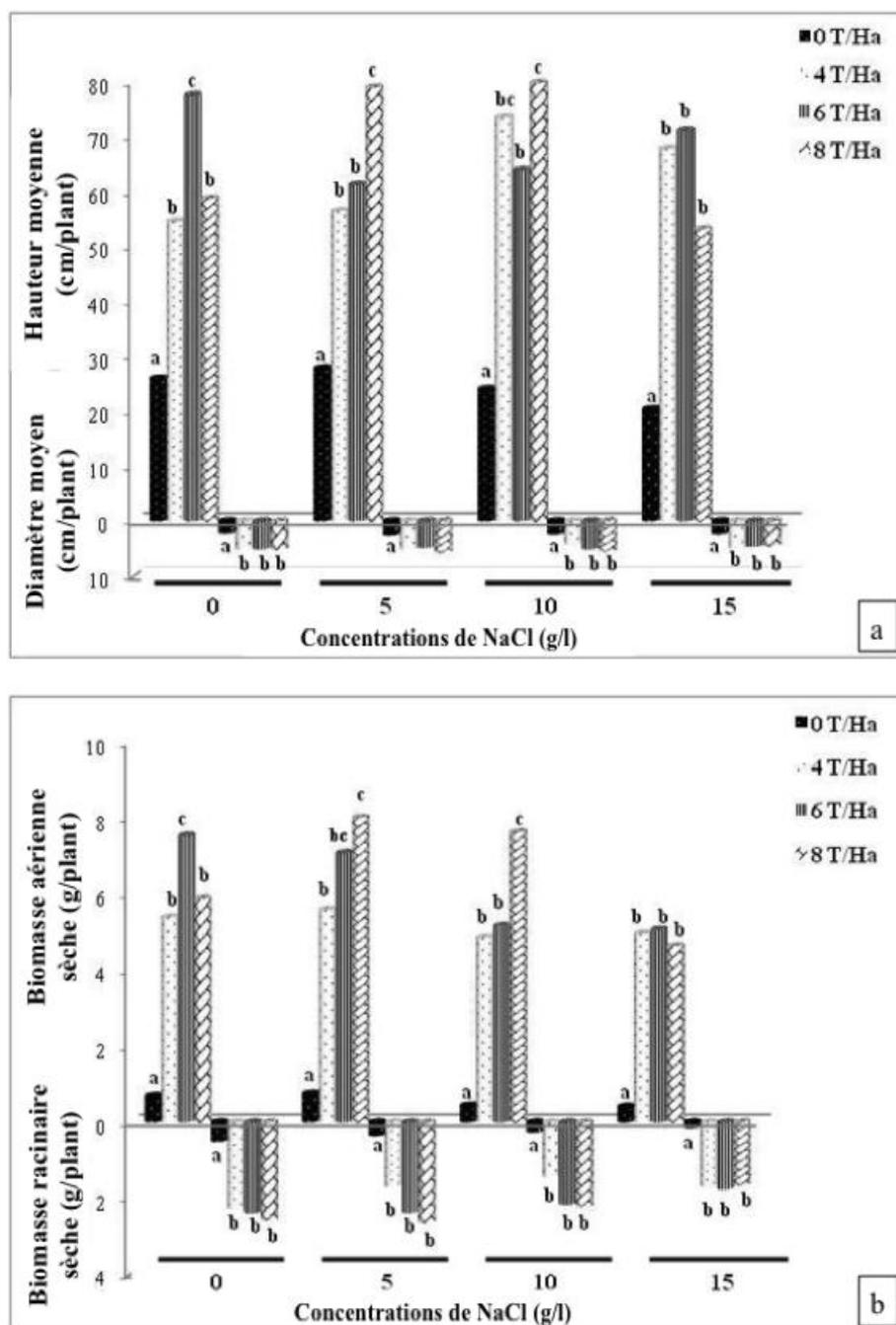


Figure 12 : Diamètre au collet, hauteur (a), biomasses aérienne et racinaire sèches (b) des plants de *P. juliflora* cultivés pendant 4 mois en serre sous 4 conditions salines (0, 5, 10 et 15 g/l NaCl) sur du sol amendé avec des coques d'arachide (0, 4, 6 et 8 T/ha)

Pour chaque concentration de NaCl, les barres suivies par les mêmes lettres ne sont pas significativement différentes au seuil de 5% selon le test de Newman et Keuls

Cependant, l'application des coques d'arachide réduit l'effet négatif du NaCl. Quelle que soit la concentration de NaCl, l'application des coques d'arachide améliore significativement la hauteur, le diamètre au collet, les biomasses aérienne et racinaire sèches des plants. Aucune différence significative n'a été notée entre les doses de coques appliquées sur la hauteur des plants de *S. senegal* et de *V. seyal* et sur le diamètre au collet de toutes les espèces (Fig. 10, 11, 12). Par contre, des différences significativement ont été observées chez *P. juliflora* avec un effet plus important de la dose 8 T/ha à 5 g/l et 10 g/l de NaCl. A l'image de la hauteur, un effet positif significatif des coques d'arachide a été obtenu sur les biomasses aérienne et racinaire sèches pour toutes les espèces et quelle que soit la concentration de NaCl (Fig. 10, 11, 12). Pour toutes les espèces, la meilleure croissance en termes de biomasse aérienne sèche a été obtenue avec 6 T/ha de coques d'arachide à 15 g/l NaCl avec une augmentation de 453%, 457% et 1107% par rapport au témoin, respectivement chez *V. seyal*, *S. senegal* et *P. juliflora*. Les doses élevées de coques d'arachide (8 T/ha) semblent diminuer les biomasses aérienne et racinaire sèches en présence de fortes concentrations de NaCl (15 g/l NaCl) avec une réduction de la biomasse aérienne de 8%, 16% et 75%, respectivement *P. juliflora*, *V. seyal* et *S. senegal* par rapport aux plants amendés avec 6 T/ha.

III.2. Effet des coques d'arachide sur quelques paramètres physiologiques des plants en conditions salines

L'analyse ANOVA des résultats obtenus montre que la salinité ainsi que les coques d'arachide ont des effets significatifs sur les teneurs en chlorophylles et en proline et le potentiel hydrique foliaire (Ψ) des plants de *V. seyal* et *P. juliflora* (Tableau 15). Cependant, aucun effet significatif de la salinité et des coques n'a été observé sur la teneur relative en eau (TRE) des plants. Un effet significatif de l'interaction entre la salinité et les coques d'arachide a été observé sur les teneurs en chlorophylles chez les trois espèces et un effet non significatif sur la TRE et le Ψ à l'exception de la TRE chez *S. senegal* et du Ψ chez *V. seyal*.

Tableau 15 : Test de significativité des effets de la salinité, des coques d'arachide et de leur interaction sur les teneurs en chlorophylle et en proline, la teneur relative en eau et le potentiel hydrique foliaire des plants de *S. senegal*, *V. seyal* et *P. juliflora* cultivés en pépinière pendant 4 mois sur du sol non stérile

Species	Facteurs	Chlorophylle	Proline	TRE	Ψ
<i>S. senegal</i>	Salinité	S (P<0,0001)	NS (P=0,892)	NS (P=0,358)	S (P<0,0001)
	Coques d'arachide	S (P<0,0001)	S (P<0,0001)	NS (P=0,345)	S (P=0,003)
	Salinité *Coques	S (P<0,0001)	NS (P=0,165)	S (P=0,047)	NS (P=0,361)
<i>V. seyal</i>	Salinité	S (P<0,0001)	S (P<0,0001)	NS (P=0,303)	S (P=0,009)
	Coques d'arachide	S (P<0,0001)	S (P<0,0001)	NS (P=0,703)	S (P<0,0001)
	Salinité *Coques	S (P<0,0001)	S (P<0,0001)	NS (P=0,167)	S (P=0,001)
<i>P. juliflora</i>	Salinité	S (P<0,0001)	S (P<0,0001)	S (P=0,004)	S (P<0,0001)
	Coques d'arachide	S (P<0,0001)	S (P<0,0001)	NS (P=0,451)	S (P<0,0001)
	Salinité *Coques	S (P<0,0001)	S (P<0,0001)	NS (P=0,558)	NS (P=0,000)

S = Significatif ; **NS** = non significatif au seuil de 5 % selon le test de Student-Newman-Keuls
 Les données de la salinité correspondent à la combinaison de toutes les doses de coques d'arachide.
 Les données des coques d'arachide correspondent à la combinaison de toutes les doses de NaCl.

Le tableau 16 montre les effets individuels de la salinité et des coques d'arachides sur les teneurs en chlorophylles et en proline. Du fait de l'absence de feuilles, la chlorophylle et la proline n'ont pas été évaluées chez les plants de *S. senegal* cultivés en présence de 15 g/l de NaCl. Les résultats montrent un effet négatif de la salinité sur la teneur en chlorophylle et un effet positif sur la teneur en proline. Cependant, les coques d'arachide améliorent significativement ces teneurs quelle que soit la concentration de NaCl. A des concentrations élevées de NaCl (15 g/l), la plus forte teneur en chlorophylle est obtenue avec 4 T/ha, 6 T/ha et 8 T/ha, respectivement chez *S. senegal*, *P. juliflora* et *V. seyal*. Une augmentation de 78% et 55% a été obtenue respectivement chez *P. juliflora* et *V. seyal*. La teneur en proline la plus élevée a été obtenue avec 8 T/ha de coques pour toutes les espèces. À 15 g/l de NaCl, la teneur en proline a été augmentée de 171% et 26% respectivement chez *V. seyal* et *P. juliflora* comparé aux plants non amendés.

Tableau 16 : Teneurs en chlorophylles et en proline des plants de *S. senegal*, *V. seyal* et *P. juliflora* cultivés pendant 4 mois en pépinière sous 4 conditions salines (0, 5, 10 et 15 g/l NaCl) sur du sol amendé avec des coques d'arachide (0, 4, 6 et 8 T/ha)

Espèces	Coques (T/ha)	Chlorophylle (a+b) (mg/g MF)				Proline (moles/g MF)			
		0	5	10	15	0	5	10	15
<i>S. senegal</i>	0	2,17a	1,41a	nd*	nd	0,90a	0,95a	nd	Nd
	4	2,93b	2,14b	2,09b	1,76a	1,10a	1,15a	1,18a	0,91a
	6	2,65b	2,01b	1,32a	1,73a	1,07a	1,05a	1,03a	1,18ab
	8	2,09a	1,89b	1,31a	1,41a	1,08a	1,09a	1,21a	1,25b
<i>V. seyal</i>	0	2,11a	2,78a	2,10a	1,84a	0,20a	0,31a	0,49a	0,55a
	4	3,87b	3,40b	2,83b	2,46b	0,49b	0,60b	1,45b	1,37b
	6	3,22b	2,67a	2,43b	2,25b	0,72b	1,12c	1,56b	1,25b
	8	4,20b	3,16b	3,07b	2,86b	0,42b	1,13c	1,77b	1,49b
<i>P. juliflora</i>	0	1,79a	2,52a	1,92a	2,00a	1,01a	1,02a	2,11a	3,96a
	4	2,81b	2,64a	3,34b	2,71b	3,73b	1,19a	5,00b	4,27ab
	6	2,63b	3,16b	2,94b	3,56b	1,09a	4,10b	4,18b	4,80ab
	8	2,78b	3,01b	3,86b	2,25b	1,30a	0,89a	4,83b	5,00b

Pour chaque espèce, les valeurs de la même colonne suivies par les mêmes lettres ne sont pas significativement différentes au seuil de 5% selon le test Student-Newman-Keuls.

Aucun effet positif significatif de l'apport des coques d'arachide n'a été noté sur la teneur relative en eau (TRE) des plants (Tableau 17). L'effet des coques d'arachide sur le potentiel hydrique dépend de l'espèce et de la concentration de NaCl. Toutefois, il devient de plus en plus négatif avec l'augmentation de la dose de coques pour toutes les concentrations de NaCl chez toutes les espèces.

Tableau 17 : Teneur relative en eau (TRE) et potentiel hydrique foliaire (Ψ) des plants de *S. senegal*, *V. seyal* et *P. juliflora* cultivés pendant 4 mois en pépinière sous 4 conditions salines (0, 5, 10 et 15 g/l NaCl) sur du sol amendé avec des coques d'arachide (0, 4, 6 et 8 T/ha)

Espèces	Doses coques (T/ha)	TRE (%)				Ψ (Mpa)			
		0	5	10	15	0	5	10	15
<i>S. senegal</i>	0	83a	84ab	89a	91a	-1,03a	-1,30a	-1,03b	-1,30a
	4	87b	84ab	82a	84a	-1,15a	-1,48a	-1,33a	-1,43a
	6	87b	82a	84a	89a	-1,08a	1,48a	-1,20ab	-1,47a
	8	85ab	88b	82a	83a	-1,28a	-1,38a	1,43a	-1,58a
<i>V. seyal</i>	0	76a	86b	78a	86a	-1,03b	-1,20b	-1,18b	-1,43a
	4	84a	81a	83a	80a	-1,43a	-1,62a	-1,62a	-1,23a
	6	83a	83ab	82a	84a	-1,12b	-1,10b	-1,28ab	-0,78b
	8	83a	83ab	87a	79a	-1,45a	-1,70a	-1,53ab	-1,58a
<i>P. juliflora</i>	0	91a	83a	87a	85a	-1,00a	-1,17a	-0,68a	-1,15a
	4	87a	83a	84a	85a	-1,00a	-1,07a	-0,43b	-1,02a
	6	92a	88a	85a	84a	-0,97a	-0,75b	-0,43b	-1,12a
	8	88a	87a	85a	84a	-0,90a	-0,67b	-0,68a	-1,08a

Pour chaque espèce, les valeurs de la même colonne suivies par les mêmes lettres ne sont pas significativement différentes au seuil de 5% selon le test Student-Newman-Keuls.

III.3. Effet des coques d'arachide sur les symbioses rhizobienne et endomycorhizienne des plants en conditions salines

Les résultats montrent que le nombre de nodosités et le taux de mycorhization diminuent avec l'augmentation de la concentration de NaCl (Tableau 18). Aucune nodosité n'a été obtenue chez *S. senegal* et *V. seyal* à partir de 5 g/l de NaCl et 10 g/l pour *P. juliflora*. Toutefois, l'apport des coques améliore la nodulation et la mycorhization des plants de *S. senegal*, *V. seyal* et *P. juliflora*.

Tableau 18 : Nombre de nodosités et taux de mycorhization des plants de *S. senegal*, *V. seyal* et *P. juliflora* cultivés pendant 4 mois en pépinière sous 4 conditions salines (0, 5, 10 et 15 g/l NaCl) sur du sol amendé avec des coques d'arachide (0, 4, 6 et 8 T/ha)

Espèces	Doses coques (T/ha)	Nombre de nodosités/plant				Taux de mycorhization (%)			
		0	5	10	15	0	5	10	15
<i>S. senegal</i>	0	4b	0	0	0	6,1a	2,3a	1,1a	1,1a
	4	0a	0	0	0	18,5b	19,3b	11,2b	8,7b
	6	0a	0	0	0	1,1a	16,6b	8,3b	3,6b
	8	0a	0	0	0	0,1a	9,1a	4,8a	2,4a
<i>V. seyal</i>	0	2a	0	0	0	1,4a	1,1a	0,3a	0,2a
	4	16b	0	0	0	2,6a	2,0b	1,7b	2,5b
	6	14b	0	0	0	10,9b	2,5b	1,2ab	2,1b
	8	0a	0	0	0	2,6a	2,4b	0,7a	1,4a
<i>P. juliflora</i>	0	4a	1a	0	0	21,2a	16,4b	13,2b	5,6b
	4	10b	18c	0	0	23,0a	37,7c	16,6b	7,7b
	6	14b	15bc	0	0	32,8b	19,7b	10,9b	7,6b
	8	11b	13b	0	0	14,6a	0,5a	0,8a	1,8a

Pour chaque espèce, les valeurs de la même colonne suivies par les mêmes lettres ne sont pas significativement différentes au seuil de 5% selon le test Student-Newman-Keuls.

Les doses 4 T/ha et 6 T/ha augmentent significativement le taux de mycorhization des plants. Toutefois la meilleure mycorhization a été obtenue avec 4 T/ha quelle que soit la concentration de NaCl pour toutes les espèces. La forte dose de coques d'arachide (8 T/ha) inhibe significativement la mycorhization des plants pour toutes les concentrations de NaCl (Tableau 18).

III.4. Effet des coques d'arachide sur les caractéristiques chimiques et microbiologiques des sols salés

Les effets des coques d'arachide sur les caractéristiques chimiques et microbiologiques des sols salés sont présentés dans les tableaux 19, 20 et 21. Les résultats ont montré que l'apport de coques augmente significativement le carbone total, l'azote total et le phosphore total des sols salés (Tableau 19). Toutefois, les doses 6 T/ha et 8 T/ha ont un effet significatif sur le carbone total et seule la dose 8 T/ha a un effet significatif sur l'azote et le phosphore totaux. Cette dose de coques augmenté de 163%, 80% et de 69% respectivement le carbone total, l'azote total et le phosphore des sols salés à 15 g/l NaCl.

Les résultats montrent que l'apport des coques d'arachide semble augmenter le pH des sols salés même si aucun effet significatif n'a été observé (Tableau 20). La conductivité électrique des sols est significativement réduite par l'apport de 8 T/ha de coques d'arachide avec une réduction de 65% à 15 g/l de NaCl. L'application des coques augmente les cations échangeables (Na^+ , Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+}) des sols salés avec une différence significative notée avec 6 T/ha à 15 g/l de NaCl. A l'image des cations échangeables, la capacité d'échange cationique est significativement augmentée par l'apport de coques pour toutes les concentrations de NaCl. A 10 g/l et 15 g/l de NaCl, seules les doses 6 T/ha et 8 T/ha ont un effet significatif.

Le tableau 21 montre l'effet des coques d'arachide sur l'activité microbienne totale (FDA) et la densité des spores endomycorhizienne des sols salés. Les résultats montrent que les coques augmentent significativement la FDA quelle que soit la concentration en NaCl. Par contre, elles diminuent significativement la densité des spores des sols. A 15 g/l de NaCl, une augmentation de 724% de la FDA et une diminution de 605% de la densité des spores ont été observées avec 8 T/ha de coques d'arachide.

Tableau 19 : Carbone total, azote total et phosphore total des sols amendés avec des coques d'arachide sur lesquels les plants de *S. senegal* ont été cultivés pendant 4 mois

Doses de coques (T/ha)	Carbone total (%)				Azote total (%)				Phosphore total (mg/kg)			
	0	5	10	15	0	5	10	15	0	5	10	15
0	0,44a	0,47a	0,56a	0,51a	0,04a	0,05a	0,05a	0,05a	45a	55a	50a	54a
4	0,93ab	0,56a	0,89ab	0,97ab	0,07ab	0,04a	0,07a	0,07ab	78ab	48a	73ab	70ab
6	1,07b	0,87b	1,10b	1,20bc	0,07ab	0,07ab	0,07a	0,08ab	71ab	68ab	86b	79ab
8	1,41b	1,14b	1,18b	1,34c	0,09b	0,08b	0,08a	0,09b	92b	72b	82b	91b

Les valeurs de la même colonne suivies par les mêmes lettres ne sont pas significativement différentes au seuil de 5% selon le test Student-Newman-Keuls.

Tableau 20 : pH, conductivité électrique (CE), somme des cations échangeables (SCE) et capacité d'échange cationique (CEC) des sols amendés avec des coques d'arachide sur lesquels les plants de *S. senegal* ont été cultivés pendant 4 mois

Coques (T/ha)	pH H2O				EC (mS/cm)				SCE (meq%)				CEC (meq%)			
	0	5	10	15	0	5	10	15	0	5	10	15	0	5	10	15
0	6,3a	6,2a	5,8a	6,2a	0,7a	1,7b	3,9b	6,0b	2,2a	4,9a	7,4a	9,2a	2,5a	2,4a	2,3a	2,0a
4	6,3a	6,1a	5,9a	6,1a	0,7a	1,4ab	3,7b	5,3b	3,3ab	6,2a	7,8a	10,3ab	3,2b	3,2b	2,9a	2,6a
6	6,4a	6,0a	6,0a	6,5a	0,6a	1,0ab	3,6b	4,5b	3,3ab	5,3a	10,1a	12,4b	3,3b	3,3b	3,2b	3,0b
8	7,0b	6,1a	6,6b	6,6a	0,5a	0,8a	1,6a	2,1a	4,3b	4,9a	7,7a	11,6ab	3,4b	3,3b	3,2b	3,1b

Les valeurs de la même colonne suivies par les mêmes lettres ne sont pas significativement différentes au seuil de 5% selon le test Student-Newman-Keuls.

$$\text{SCE} = \text{K}^+ + \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{Na}^+$$

Tableau 21 : Activité microbienne totale et densité des spores des sols salés amendés avec des coques d'arachide sur lesquels les plants de *S. senegal* ont été cultivés pendant 4 mois

Coques (T/ha)	Activité microbienne totale (μg fluorescein / g sol / h)				Densité des spores (spores / 100 g sol)			
	0	5	10	15	0	5	10	15
0	1,09a	0,97a	0,94a	0,54a	241b	185b	116b	134c
4	5,97b	3,91b	4,35b	3,00b	20a	24a	11a	60b
6	6,09b	5,55c	4,73b	3,18b	17a	16a	11a	31ab
8	7,87b	5,85c	4,78b	4,45c	16a	14a	08a	19a

Les valeurs de la même colonne suivies par les mêmes lettres ne sont pas significativement différentes au seuil de 5% selon le test Student-Newman-Keuls.

Les corrélations entre l'apport des coques d'arachide et les variables évaluées en fonction de la concentration de NaCl sont illustrées par la figure 13. Les deux axes F1 et F2 de l'analyse en composantes principales (ACP) expliquent 84,69% de la variabilité des données démontrant ainsi que l'application des coques d'arachide affecte fortement les caractéristiques chimiques et microbiennes des sols salés. L'effet des coques dépend du niveau de salinité du sol. L'azote total, le carbone total, le phosphore total et la FDA sont fortement et positivement corrélés à l'axe F1 ($r = +0,93, +0,95, +0,93$ et $+0,58$), tandis que la densité des spores est négativement corrélée à cet axe ($r = -0,66$). Cependant, la conductivité électrique et la salinité du sol sont fortement et positivement corrélés à l'axe F2 ($r = +0,71$ et $+0,71$). La conductivité électrique et la salinité du sol sont modérées avec 6 T/ha de coques d'arachide. Le phosphore total, le carbone total, l'azote total et l'activité microbienne totale (FDA) sont améliorés avec la combinaison d'une faible (5 g/l) et moyenne (10 g/l) concentrations de NaCl et une forte dose de coques d'arachide (8 T/ha). Cependant, la densité des spores est plus élevée en l'absence de coques d'arachide quelle que soit la concentration de NaCl.

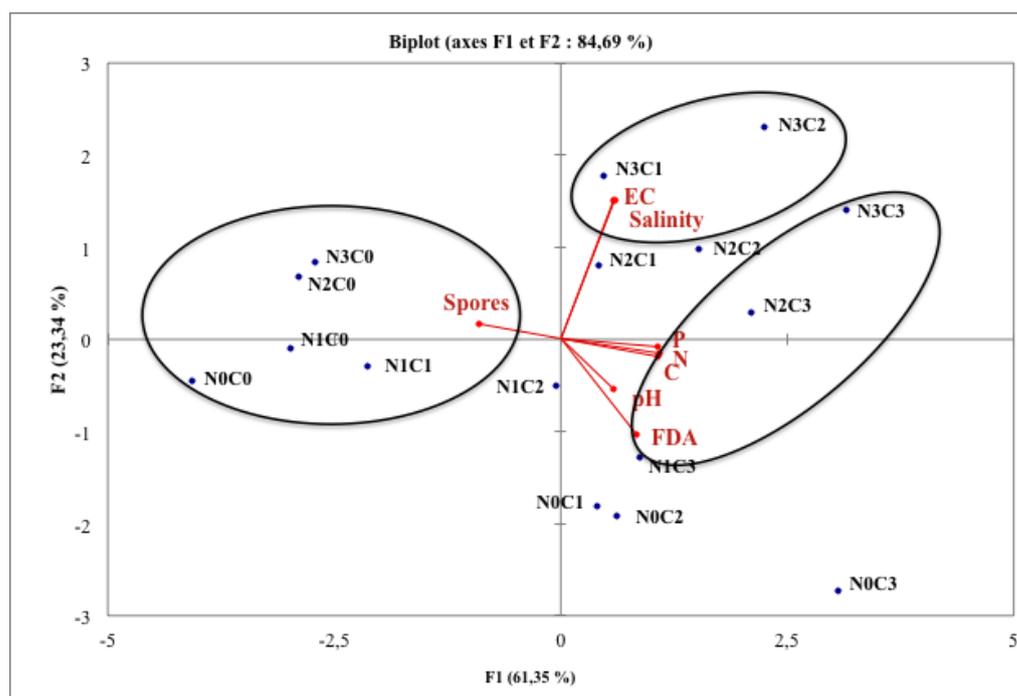


Figure 13 : Analyse en composantes principales (ACP) montrant les relations entre la conductivité électrique (CE), la salinité, le pH, le carbone total, l'azote total, le phosphore total, la densité des spores et l'activité microbienne totale et les 16 combinaisons de coques d'arachide et les concentrations de NaCl

N0 = 0 g/l, N1 = 5 g/l, N2 = 10 g/l, N3 = 15 g/l NaCl

C0 = 0 T/ha, C1 = 4 T/ha, C2 = 6 T/ha, C3 = 8 T/ha de coques d'arachide

IV. Discussion

Nos résultats ont montré que les coques d'arachide augmentent la croissance des plants de *S. senegal*, *V. seyal* et *P. juliflora* cultivés en conditions salines. L'augmentation de la hauteur, du diamètre au collet, les biomasses aérienne et racinaire, les teneurs en chlorophylles et en proline des plants, s'expliqueraient l'amélioration de leur nutrition minérale avec comme conséquence une stimulation des fonctions physiologiques (photosynthèse, synthèse proline,...). L'accumulation de proline participe à l'ajustement osmotique et donc à la tolérance à la salinité. En effet, l'application des coques d'arachide augmente la disponibilité des nutriments (macro et micro) pour les plantes. Des résultats similaires ont été obtenus avec du compost d'arachide sur la croissance de *Dracaena marginata* (Torkashvand *et al.*, 2015) et aussi avec d'autres amendements organiques sur *Sophora japonica* Linn (Wang *et al.*, 2014), le riz (Shaaban *et al.*, 2013 ; Hossain et Sarker, 2015). L'effet négatif de la forte dose de

coques d'arachide (8 T/ha) sur la croissance des plants serait lié à une compaction du sol limitant ainsi son aération et l'absorption des éléments minéraux par la plante.

L'apport de coques d'arachide stimule la nodulation et la mycorhization des plants de *S. senegal*, *V. seyal* et *P. juliflora* cultivés sous conditions salines. Cet effet positif est dû à une amélioration de la nutrition minérale des plants augmentant ainsi leur capacité symbiotique. En effet, il est admis que la mise en place de la symbiose microbienne (rhizobienne et mycorhizienne) requiert une teneur minimale en éléments nutritifs, en particulier en N et en P. Dans notre étude, 4 T/ha de coques d'arachide a permis la meilleure symbiose aussi bien rhizobienne que mycorhizienne. Des résultats similaires ont été obtenus par Swanepoel *et al.* (2011). Toutefois, la forte dose de coques (8 T/ha) inhibe ces symbioses microbiennes. Les fortes teneurs du sol en azote et en phosphore assimilables inhibent les symbioses microbiennes.

La faible productivité des sols salés est généralement attribuée à leur toxicité ou les dommages causés par des quantités excessives de sels solubles, mais aussi à leur faible fertilité des sols (Liang *et al.*, 2003). Nos résultats ont montré que l'application des coques d'arachide améliore les propriétés des sols salés. L'apport de coques semble augmenter le pH du sol. Cet effet des coques s'expliquerait par leur teneur assez élevée en cations basiques (Ca^{2+} , K^+ , ...) augmentant ainsi le pH du sol (Pocknee et Sumner, 1997). Des résultats similaires ont été obtenus par Wang *et al.* (2014) avec du compost de déchets verts. Par contre, nos résultats sont contradictoires à ceux obtenus par Pattanayak *et al.* (2001), Yaduvanshi (2001) et Smiciklas *et al.* (2002), qui ont montré une diminution du pH du sol après l'apport de matières organiques composées. Cette situation résulterait de la différence dans la composition chimique des matières organiques utilisées.

La conductivité électrique (CE) est une mesure directe de la salinité et qui indique indirectement la concentration des sels solubles d'un sol. Nos résultats ont montré que les coques d'arachide diminuent la CE avec un effet significatif à 8 T/ha. Des travaux antérieurs ont montré qu'une augmentation de la concentrations ions Ca^{2+} dans le sol provoque le remplacement des ions Na^+ par les ions Ca^{2+} au niveau des sites d'échange de cations sur les particules de sol (Qadir et Oster, 2004). Ces ions Na^+ libres seront par la suite drainés par les eaux de ruissellement entraînant ainsi la réduction de la salinité du sol (Tejada *et al.*, 2006). L'analyse chimique des coques utilisées dans cette étude montre de fortes teneurs en calcium. Il est important de noter que l'absence d'effet significatif des faibles doses de coques (4 T/ha et 6 T/ha) sur la CE du sol s'expliquerait par un faible lessivage noté dans nos conditions

expérimentales. En effet, les plants ont été cultivés dans des gaines et arrosés à la capacité au champ; ce qui provoque un manque de ruissellement pour un bon drainage des ions Na^+ . Nos résultats sont en concordance avec ceux obtenus par Wang *et al.* (2014) qui ont montré une baisse significative de la CE du sol en milieu naturel après deux ans d'application de matières organiques.

La capacité d'échange cationique (CEC) est une propriété intrinsèque du sol définissant la concentration des sites chargés négativement sur les colloïdes du sol qui peuvent adsorber des cations échangeables. Il est considéré comme un bon indicateur de la productivité du sol. Les sols avec une CEC élevée sont plus fertiles car ils conservent plusieurs cations (McKenzie *et al.*, 2004) et de nombreux éléments nutritifs des plantes sont des cations (Klute *et al.*, 1994). L'application des coques d'arachide augmente la CEC. Cela pourrait être le résultat d'une bonne minéralisation de la matière organique. Nos résultats ont montré que l'application des coques d'arachide augmente les cations échangeables Ca^{2+} , K^+ et Mg^{2+} , qui sont des concurrents des ions Na^+ dans les conditions de sodicité, limitant ainsi l'entrée de Na^+ dans le complexe d'échange (Bao, 2005).

L'utilisation de coques d'arachide comme amendement organique des sols salés améliore leur fertilité en augmentant la teneur en carbone total, en azote total, en phosphore total et l'activité microbienne totale (FDA). L'addition de matières organiques augmente la disponibilité de substrat pour l'activité microbienne favorisant ainsi une bonne minéralisation de la matière organique, permettant une augmentation des nutriments. Nos résultats sont en concordance avec ceux obtenus par plusieurs auteurs utilisant d'autres types de matières organiques (Madejon *et al.*, 2001; Marschner *et al.*, 2003; Lakhdara *et al.*, 2010).

V. Conclusion et perspectives

Nos résultats ont montré que les coques d'arachide comme amendement organique améliorent la croissance et les teneurs en chlorophylles et en proline des plants de *S. senegal*, *V. seyal* et *P. juliflora*. En outre, elles améliorent les caractéristiques chimiques (éléments minéraux, capacité d'échange cationique, cations échangeables,...) et microbiologiques (activité microbienne totale) des sols salés. L'apport des coques réduit la conductivité électrique et la salinité du sol. Cependant, les doses 6 et 8 T/ha réduisent la nodulation et la mycohization des plants. En présence de forte concentration de NaCl (15 g/l), l'amendement avec 8 T/ha de coques d'arachide inhibe la croissance des plants. La dose 6 T/ha a permis la meilleure la

croissance des plants en conditions salines. Cependant, des essais au champ sur plusieurs années seraient nécessaires pour confirmer nos résultats. Par ailleurs, il s'avère nécessaire d'évaluer l'effet de la combinaison de l'inoculation microbienne et l'application des coques d'arachide sur la croissance des plants de *S. senegal*, *V. seyal* et *P. juliflora* en pépinière et en milieu réel.

CHAPITRE IV : Evaluation de l'effet combiné de l'inoculation microbienne et des coques d'arachide sur la croissance de *Senegalia senegal* (L.) Britton, *Vachellia seyal* (Delile) P. Purter et *Prosopis juliflora* (Swartz) DC en conditions salines

Chapitre IV : Evaluation de l'effet combiné de l'inoculation microbienne et des coques d'arachide sur la croissance de *Senegalia senegal* (L.) Britton, *Vachellia seyal* (Delile) P. Purter et *Prosopis juliflora* (Swartz) DC en conditions salines

Ce chapitre a fait l'objet de deux articles qui seront soumis respectivement dans *Symbiosis* et *Agroforestry System*.

Article 1: Fall D., Bakhoun N., Fall F., Diouf F., Diouf D. Arbuscular Mycorrhizal Fungi (AMF) and rhizobia improve *Senegalia senegal* (L.) Britton, *Vachellia seyal* (Delile) P.J.H. Hurter and *Prosopis juliflora* (Swartz) DC tolerance to salinity in greenhouse conditions

Abstract

In Senegal, 1.7 million ha of the 3.8 million ha of agricultural land are affected by salinity, which leads to decrease of crops yield and the degradation of forest ecosystems. Salty soils reclamation can be achieved by biological methods, such as afforestation of degraded lands with salt tolerant plants. Our study aimed to select the best microbial inoculum for improving salt tolerance of *Senegalia senegal*, *Vachellia seyal* and *Prosopis juliflora*. Thus, the effect of microbial inoculation on morphological and physiological traits of plants was assessed in greenhouse conditions. Seedlings were individually cultivated in plastic bags containing non sterile sandy soil. For each species, inoculation was performed at transplantation with 5 ml of bacterial mixture comprising two selected rhizobial strains (ORS 3574 and ORS 3593 for *S. senegal*; ORS 3356 and ORS 3359 for *V. seyal* ; Pj 34 and Pj 36 for *P. juliflora*), and 20 g of a cocktail of three arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) strains (*Glomus aggregatum*, *G. fasciculatum*, *Rhizophagus irregularis*). After one month, seedlings were gradually watered with four saline solutions (0, 5, 10, 15 g/l NaCl) during 5 months. Results showed that the positive effect of microbial inoculation on seedlings growth (collar diameter, height, shoot and root biomass) depends on plant species, NaCl concentration and type of inoculum. Whatever, the plant species, the highest growth of seedlings was obtained with dual inoculation (rhizobia + AMF). However, any significant effect of inoculation was noted on relative water content excepted for *V. seyal* seedlings grown on 15 g/l NaCl and inoculated with rhizobia and AMF. Leaf water potential became significantly more negative in *P. juliflora* seedlings double inoculated and cultivated in high NaCl concentrations (10 and 15 g/l). Nodulation and root mycorrhizal colonization were higher in seedlings inoculated with rhizobia and AMF. Our results showed that microbial inoculation particularly dual inoculation with selected rhizobial and AMF strains improved *S. senegal*, *V. seyal* and *P. juliflora* growth in saline conditions. Nevertheless field trials are needed to improve the successful of saline soils revegetalization.

Keywords: Mycorrhiza, rhizobia, leguminous trees, Salinity tolerance, Biotechnologies.

Article 2: Fall D., Bakhoum N., Fall F., Diouf F., Faye M., Ndiaye C., Diouf D. Combination of microbial inoculation and peanut shells improves *Senegalia senegal* (L.) Britton, *Vachellia seyal* (Delile) P. Purter and *Prosopis juliflora* (Swartz) DC growth under saline conditions

Abstract

Salinization causes the loss of soil fertility, which leads to the decrease of plants development, crops yield and the degradation of the ecosystem. Salty soils reclamation can be achieved simultaneously by adding organic matter to remove the soluble sodium of soil and revegetation by salt tolerant species. Our study aimed to assess in greenhouse and natural conditions, the effect of the combination of microbial inoculation and peanut shells on *Senegalia senegal*, *Vachellia seyal* and *Prosopis juliflora* growth under salinity conditions. Seedlings were individually cultivated in plastic bags containing a mixture of non-sterile sandy soil and 6 T/ha of peanut shells var 73-33. Seedlings were inoculated at transplantation with 5 ml of bacterial mixture of two rhizobial strains (ORS 3574 and ORS 3593 for *S. senegal*; ORS 3356 and ORS 3359 for *V. seyal* ; Pj 34 and Pj 36 for *P. juliflora*), and 20 g of a cocktail of three arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) strains (*Glomus aggregatum*, *G. fasciculatum*, *Rhizophagus irregularis*). After one month, seedlings were gradually watered with four saline solutions (0, 5, 10, 15 g/l NaCl) during 4 months. Seedlings grown on 0 g/l NaCl were planted in Sadioga (Fatick region). Results showed that microbial inoculation (rhizobia + AMF), peanut shells and their combination improved height, collar diameter, shoot and root biomass, nodulation, root mycorrhizal colonization and the survival rate of *S. senegal*, *V. seyal* and *P. juliflora* seedlings grown in greenhouse and after 4 months after plantation in natural habitat under saline conditions. However, any significant differences were found between seedlings amended with peanut shells only and those inoculated and amended. The highest plants growth was still obtained with the combination of microbial inoculation and peanut shells, whatever the species. Our results showed that the combination of microbial inoculation and peanut shells improved *S. senegal*, *V. seyal* and *P. juliflora* growth in saline conditions. Nevertheless, it is necessary to follow the survival and growth of plants on natural conditions for several years to evaluate the effect of this combination.

Keywords: Mycorrhiza, rhizobia, organic amendment, leguminous trees, Salt tolerance.

I. Introduction

La salinisation des sols contribue à la réduction de la production végétale et parfois la disparition du couvert végétal naturel. Ainsi, l'offre de services provenant des forêts naturelles (fruits forestiers, bois de chauffe et de service, fourrage,...) devient insuffisante pour satisfaire la demande. Les associations symbiotiques sont bien connues pour améliorer la nutrition et la productivité des plantes notamment chez les légumineuses qui sont capables de développer simultanément des associations aussi bien avec les champignons mycorhiziens qu'avec les bactéries fixatrices d'azote ou rhizobia (Azcón et Al-Atrash, 1997 ; Joner et Johansen, 2000). La nodosité permet la réduction de l'azote atmosphérique. Quant à la symbiose mycorhizienne, elle développe des mécanismes physiologiques et biochimiques pour la mobilisation du phosphore du sol (Smith et Gianinazzi-Pearson, 1988 ; Hatimi *et al.*, 1997) et améliore l'état hydrique de la plante (Requena *et al.*, 2001). Les champignons mycorhiziens peuvent aussi améliorer le prélèvement de l'azote (Shachar-Hill, 1997) et son assimilation (Azcón et Tobar, 1997). Les phosphatases des hyphes mycéliens favorisent la libération du phosphore inorganique (Pi) immobile du sol et la minéralisation des sources organiques des phosphates (De Mars et Broener, 1995 ; Joner Erik et Johansen, 2000). La disponibilité du phosphore dans le sol et surtout sa mobilisation par la plante ont un effet direct sur sa capacité à fixer l'azote atmosphérique (Banet, 1996). La tolérance des plantes à la salinité peut être améliorée par les symbiotes racinaires (Dixon *et al.*, 1993 ; Diouf *et al.*, 2005; Thrall *et al.*, 2005; Coba de la Peña et Pueyo, 2011).

Cette salinisation contribue également à la dégradation des propriétés physiques, chimiques et microbiologiques des sols entraînant ainsi une baisse de leur fertilité. Ces propriétés peuvent être restaurées par l'apport de matières organiques (MO). Il est également important de noter que l'application de la MO pour restaurer la fertilité des sols salés est nécessaire pour une utilisation durable de ces terres et une bonne productivité des plantes (Choudhary *et al.*, 2004; Wong *et al.*, 2009). Les résultats du chapitre III ont montré l'apport des coques d'arachide améliorent les caractéristiques chimiques et microbiologiques des sols salés et la croissance des plants de *Senegalia senegal*, *Vachellia seyal* et *Prosopis juliflora* en serre sous conditions salines. Ainsi, il s'avère intéressant de tester la combinaison de l'inoculation microbienne et de l'apport des coques d'arachide sur la tolérance à la salinité des plantes. Ce dernier chapitre de notre thèse a pour objectif d'évaluer l'effet combiné de l'inoculation microbienne et des coques d'arachide *var* 73-33 sur la croissance des plants de *S. senegal*, *V. seyal* et *P. juliflora* en serre et en milieu réel sous conditions salines.

II. Matériel et méthodes

II.1. Sélection d'un inoculum microbien pour améliorer la croissance des espèces en conditions salines

II.1.1. Dispositif expérimental

Les graines de *S. senegal*, de *V. seyal* et de *P. juliflora*, scarifiées et prégermées comme décrit dans le chapitre II, ont été repiquées dans les gaines en plastique (12 cm x 25 cm) contenant du sol non salé et non stérile de Sadioga (voir Tableau 3 du Chapitre II). Un dispositif complet avec deux facteurs a été utilisé pour chaque espèce: le facteur inoculation avec 4 modalités (plants non inoculés ou témoins, plants inoculés avec des rhizobia, plants inoculés avec des champignons mycorhiziens à arbuscules (CMA) et plants inoculés avec rhizobia et CMA) et le facteur salinité avec 4 niveaux (0, 5, 10, 15 g/l de NaCl). Ainsi, au total 16 traitements (4x4) avec 10 répétitions par traitement ont été étudiés.

Les plants ont été inoculés au repiquage avec 5 ml d'une préculture bactérienne d'un mélange de deux souches et de 20 g d'inoculum fongique mixte par gaine. Pour chaque espèce végétale, deux souches de rhizobia, sélectionnées pour leur efficacité et leur tolérance au sel ont été retenues. Ainsi, les souches ORS 3574 et ORS 3593 ont été choisies pour *S. senegal* (Bakhoum *et al.*, 2012), ORS 3356 et ORS 3359 pour *V. seyal* (Diouf *et al.*, 2010), Pj 34 et Pj 36 pour *P. juliflora* (Diagne et Ingleby, 2003). Pour les CMA, les souches de *Glomus aggregatum* (IR 27), *G. fasciculatum* et *Rhizophagus irregularis* (DAOM197198) ont été utilisées pour les trois espèces végétales (Ndoye *et al.*, 2013).



Planche photographique 13 : Inoculation endomycorhizienne (CMA)



Planche photographique 14 : Inoculation rhizobienne

Afin de permettre la nodulation et la mycorhization, le stress salin a été appliqué après un mois de culture. L'application du stress salin, l'arrosage des plants et le contrôle de la salinité ont été effectués comme décrit dans le chapitre II.

II.1.2. Evaluation des paramètres de croissance et physiologiques

Après 5 mois de culture, les paramètres de croissance (hauteur, diamètre au collet, biomasses aérienne et racinaires), physiologiques (teneur relative en eau et potentiel hydrique) ont été évalués comme décrit dans le chapitre II.



Planche photographique 15 : Plants en serr après 5 mois de culture

II.1.3. Evaluation des symbioses microbiennes

Le nombre de nodosités et les taux de mycorhization ont été évalués comme décrits dans le chapitre II.

II.2. Etude de l'effet combiné de l'inoculation microbienne et des coques d'arachide sur la croissance des espèces en conditions salines

II.2.1. Expérimentation en serre

Les plants ont été cultivés dans des gaines contenant du sol non salé et non stérile de Sadioga. Quatre niveaux de salinité (0, 5, 10, 15 g/l de NaCl) ont été étudiés. Pour chaque espèce et pour chaque niveau de salinité, quatre traitements ont été appliqués :

- **T** : plants témoins (sans coques d'arachide ni inoculation microbienne);
- **Ino** : plants doublement inoculés (rhizobia + CMA)
- **Coques** : plants amendés avec des coques d'arachide *var* 73-33
- **Ino+Coques** : plants inoculés et amendés avec des coques d'arachide

Les graines, scarifiées ont été prégermées sur de l'eau gélosée (0,9%) puis repiquées dans les gaines (12 cm x 25 cm) contenant le substrat de croissance constitué d'un mélange de sol non salé et non stérile de Sadioga (voir Tableau 3 du Chapitre II) avec les coques d'arachide broyées (*var* 73-33, 6T/ha).

L'apport des coques d'arachide a été réalisé comme décrit précédemment dans le chapitre III et la double inoculation comme ci-dessus. Le stress salin a été appliqué comme décrit dans le chapitre II. Pour chaque espèce, un dispositif en blocs complets randomisés avec 16 traitements et 20 répétitions par traitement a été installé.

Afin de permettre la nodulation et la mycorhization, le stress salin a été appliqué après un mois de culture. L'application du stress salin, l'arrosage des plants et le contrôle de la salinité ont été effectués comme décrit dans le chapitre II.

Après 4 mois de culture, les paramètres de croissance (hauteur, diamètre au collet, biomasses aérienne et racinaire), la teneur relative en eau, la nodulation et la mycorhization ont été évalués comme décrit dans le chapitre II.



Planche photographique 16 : Mise en place du dispositif en serre



Planche photographique 17 : Plants après 4 mois en serre

II.2.2. Expérimentation en milieu réel

Une parcelle de tanne herbeuse de 6475 m² (185 m x 35 m), contigüe à une tanne arbustive, a été délimitée dans notre site d'étude. Les caractéristiques physico-chimiques de cette parcelle sont consignées dans le tableau 22. La parcelle a été divisée en 3 sous-parcelles (2100 m² chacune) pour les 3 espèces (*S. senegal*, *V. seyal* et *P. juliflora*). Chaque sous-parcelle a été subdivisée en trois blocs de 700 m² chacun (B1, B2 et B3). Dans chaque bloc, six plants de quatre traitements : témoins (**T**), inoculés (**I**), coque d'arachide (**C**) et Inoculés + coques (**IC**) des plants témoins cultivés en absence de NaCl ont été transplantés selon un dispositif randomisé avec un écartement de 5 m x 5 m (Fig. 1). Au total, pour chaque traitement 18 plants ont été plantés.

Tableau 22 : Caractéristiques physiques et chimiques du sol de la tanne herbeuse du site (Sadioga)

Caractéristiques physiques	Valeurs
Argiles	09,6 %
Limons	08,7 %
Sables	81,5 %
Caractéristiques chimiques	
pH H ₂ O	5,0
Conductivité électrique (25°C)	14510 µS/cm
Salinité	8,4 ‰
Azote total	0,04 %
Carbone total	0,46 %
Phosphore total	58,0 mg/kg
Calcium (Ca)	4,14 méq%
Magnésium (Mg)	1,58 méq%
Sodium (Na)	2,17 méq%
Potassium (K)	1,56 méq%
Capacité d'échange cationique (CEC)	2,41 méq%

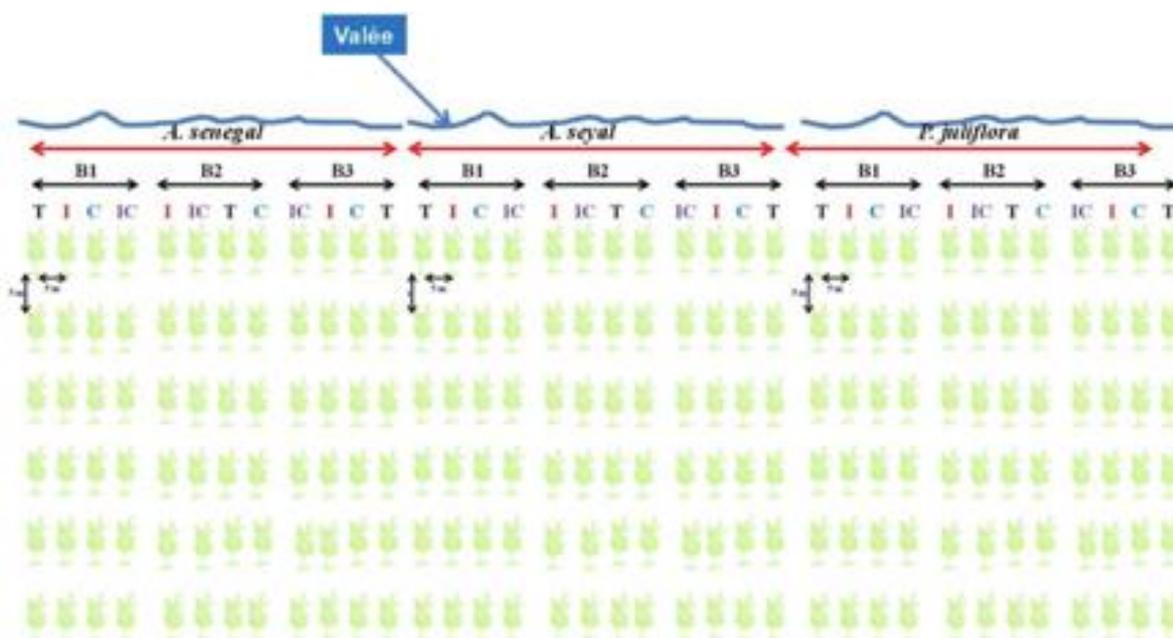


Figure 14 : Dispositif expérimental en milieu naturel à Sadioga (Région de Fatick, Département de Fatick)



Planche photographique 18 : Transplantation dans le site d'étude en août 2015



Planche photographique 19 : Plant de *P. juliflora* dans le site d'étude en août 2015

II.3. Analyse statistique des données

Les données ont été soumises à une analyse de variance ANOVA à un facteur. Les comparaisons entre les différentes moyennes ont été effectuées par le test de Newman-Keuls à 5% de probabilité. Les données exprimées en pourcentage ont été transformées en arc sinus avant d'être soumises à une analyse ANOVA. Les analyses ont été réalisées avec le logiciel XLSTAT version 2010.

III. Résultats

III.1. Sélection d'un inoculum microbien pour améliorer la croissance des espèces en conditions de stress salin

III.1.1. Etude de l'effet de l'inoculation microbienne sur la croissance des espèces

L'analyse ANOVA des résultats obtenus montre que la salinité a un effet négatif significatif sur la hauteur, le diamètre au collet, les biomasses aérienne et racinaire sèches des plants de *S. senegal*, *V. seyal* et *P. juliflora* (Tableau 23). Par contre, l'inoculation microbienne n'a aucun effet significatif sur le diamètre au collet des plants de *S. senegal* et *V. seyal* et sur la hauteur des plants de *V. seyal*. L'interaction entre la salinité et l'inoculation a un effet significatif sur les paramètres de croissance à l'exception de la hauteur et du diamètre au collet des plants de *S. senegal* et de *P. juliflora*.

Tableau 23 : Test de significativité des effets de la salinité, de l'inoculation microbienne et de leur interaction (NaCl*Inoc) sur la hauteur, le diamètre au collet, les biomasses aérienne et racinaire sèches des plants de *S. senegal*, *V. seyal* et *P. juliflora* cultivés en pépinière pendant 5 mois sur du sol non stérile.

Espèces	Facteurs	Hauteur	Diam. col.	BAS	BRS
<i>S. senegal</i>	NaCl	S ($p < 0,0001$)			
	Inoculation	S ($p = 0,001$)	NS ($p = 0,381$)	S ($p < 0,0001$)	S ($p < 0,0001$)
	NaCl*Inoc	NS ($p = 0,480$)	NS ($p = 0,285$)	S ($p < 0,0001$)	S ($p < 0,0001$)
<i>V. seyal</i>	NaCl	S ($p < 0,0001$)			
	Inoculation	NS ($p = 0,590$)	NS ($p = 0,574$)	S ($p < 0,0001$)	S ($p < 0,0001$)
	NaCl*Inoc	S ($p = 0,048$)	S ($p = 0,002$)	S ($p < 0,0001$)	S ($p = 0,001$)
<i>P. juliflora</i>	NaCl	S ($p < 0,0001$)			
	Inoculation	S ($p < 0,0001$)	S ($p = 0,001$)	S ($p < 0,0001$)	NS ($p = 0,847$)
	NaCl*Inoc	NS ($p = 0,524$)	NS ($p = 0,200$)	S ($p < 0,0001$)	S ($p = 0,039$)

S = Significatif ; NS = non significatif au seuil de 5 % selon le test de Student-Newman-Keuls

Les données de la salinité correspondent à la combinaison de toutes les inoculations microbiennes.

Les données des inoculations microbiennes correspondent à la combinaison de toutes les doses de NaCl.

Les effets individuels de la salinité et de l'inoculation microbienne sont présentés dans le tableau 24. Les résultats ont montré que la salinité réduit la croissance (hauteur, diamètre au collet, biomasses aérienne et racinaire sèche) des plants de *S. senegal*, *V. seyal* et *P. juliflora*. Cependant, l'inoculation réduit l'effet négatif du NaCl sur la croissance des plants. Toutefois, cet effet dépend de la concentration de NaCl, de l'espèce et du type de microorganisme utilisé. Aucun effet positif de l'inoculation microbienne (rhizobienne, mycorhizienne et double inoculation) n'a été noté sur le diamètre au collet des plants de *S. senegal* et de *V. seyal* pour toutes les concentrations de NaCl. Par contre un effet significatif a été noté chez *P. juliflora*. A 10 g/l, l'inoculation avec les rhizobia et la double inoculation ont amélioré significativement le diamètre au collet avec une augmentation environ de 20%. A 15 g/l, seule l'inoculation avec les CMA a augmenté significativement le diamètre au collet des plants.

Tableau 24 : Diamètre au collet, hauteur, biomasses aérienne et racinaire sèches des plants de *S. senegal*, *V. seyal* et *P. juliflora* cultivés en pépinière pendant 5 mois en conditions salines (0, 5, 10, 15 g/l NaCl) et inoculés avec des rhizobia et des CMA sur sol non stérile.

Espèces	Inoculations	Diamètre au collet (mm/plant)				Hauteur (cm/plant)				BAS (g/plant)				BRS (g/plant)			
		0	5	10	15	0	5	10	15	0	5	10	15	0	5	10	15
<i>S. senegal</i>	Témoin	3,55a	3,27a	3,13a	2,76a	23,6a	19,4a	19,1a	16,0a	0,53a	0,47a	0,41a	0,35a	1,34a	1,30b	0,56a	0,56a
	Rhizobia	3,48a	3,38a	2,99a	2,87a	23,8a	20,7a	20,4a	20,1ab	0,59a	0,56b	0,53b	0,43b	1,37a	0,84a	0,70b	0,64a
	CMA	3,81a	3,38a	3,05a	2,79a	24,0a	19,9a	20,8a	19,0a	0,80b	0,59b	0,55b	0,44b	1,61a	1,55c	0,74b	0,80b
	Rhizo+CMA	3,50a	3,40a	3,04a	2,59a	24,2a	23,7a	22,8a	21,9b	1,10c	0,67c	0,58b	0,52c	2,12b	1,32b	0,79b	0,75b
<i>V. seyal</i>	Témoin	2,12a	1,57ab	1,38a	1,14ab	30,2a	26,8a	22,9a	25,0a	0,47a	0,27a	0,16a	0,14a	1,88a	1,14b	0,60bc	0,49ab
	Rhizobia	1,90a	1,31a	1,47a	1,25ab	31,2a	24,8a	23,1a	27,3a	0,69b	0,37a	0,25b	0,20ab	1,55a	0,50a	0,40a	0,36a
	CMA	2,05a	1,83b	1,37a	1,06a	32,5a	28,1a	24,2a	22,9a	0,79b	0,49b	0,27b	0,26b	2,49b	1,03b	0,64c	0,59b
	Rhizo+CMA	1,77a	1,91b	1,54a	1,37b	35,3a	28,7a	27,4a	25,8a	0,85b	0,56b	0,28b	0,27b	1,86a	0,99b	0,55b	0,50b
<i>P. juliflora</i>	Témoin	2,32a	1,65a	1,50a	1,53a	36,9a	23,3a	20,9a	20,5a	0,69a	0,34a	0,25a	0,25a	0,54a	0,23a	0,16a	0,13a
	Rhizobia	2,35a	1,97b	1,76bc	1,76ab	37,0a	25,6ab	25,4b	22,4ab	0,73a	0,42a	0,42b	0,39b	0,39a	0,25a	0,24b	0,21b
	CMA	2,63a	1,84ab	1,83c	1,83b	37,5a	27,2b	25,1ab	23,3ab	1,00b	0,49b	0,41b	0,40b	0,48a	0,26a	0,25b	0,21b
	Rhizo+CMA	2,38a	1,96b	1,65ab	1,71ab	39,2a	29,7b	27,3b	26,2b	1,35c	0,57b	0,50b	0,48c	0,49a	0,28a	0,25b	0,20b

Pour chaque espèce, les valeurs d'une colonne suivies par les mêmes lettres ne sont pas significativement différentes au seuil de 5% selon le test de Newmann et Keuls

Pour la hauteur, seule la double inoculation a un effet significatif en présence de 10 et 15 g/l de NaCl pour *S. senegal* et *P. juliflora* avec respectivement une augmentation de 35% et 31% à 15 g/l. Aucun effet significatif de l'inoculation n'a été noté sur la hauteur des plants de *V. seyal*. Quelle soit la dose de NaCl, l'inoculation microbienne a un effet significatif sur la biomasse aérienne sèche des plants cultivés en présence de NaCl à l'exception de l'inoculation rhizobienne de *V. seyal* à 5 g/l et 15 g/l. A 15 g/l, toutes les inoculations ont amélioré significativement la biomasse aérienne des plants. Cependant, chez *S. senegal* et *P. juliflora*, une différence significative a été notée entre les biomasses aériennes des plants ayant reçu une double inoculation comparés aux plants inoculés avec des rhizobia seuls ou CMA seuls. Par contre, chez *V. seyal*, aucune différence significative n'a été obtenue entre les inoculations. A l'image de la biomasse aérienne, l'inoculation microbienne améliore la biomasse racinaire des plants cultivés en présence de NaCl. Cependant, à 15 g/l de NaCl, seules l'inoculation avec les CMA et la double inoculation ont amélioré significativement la biomasse racinaire. Par contre, aucune différence significative n'a été observée entre ces inoculations chez *S. senegal* et *P. juliflora*. Chez *V. seyal*, aucun effet significatif de l'inoculation n'a été noté à 15 g/l (Tableau 24).



Planche photographique 20 : Plants de *S. senegal* cultivés pendant 5 mois en présence de 5 g/l de NaCl et inoculés avec des rhizobia et des CMA sur sol non stérile

III.1.2. Etude de l'effet de l'inoculation microbienne sur le statut hydrique des espèces en conditions de stress salin

L'analyse ANOVA des résultats montre que la salinité a un effet significatif sur la teneur relative en eau (TRE) et le potentiel hydrique foliaire (Ψ) des plants de *S. senegal*, *V. seyal* et *P. juliflora* (Tableau 25). L'inoculation microbienne n'a aucun effet significatif sur la TRE et le Ψ à l'exception de celui de *P. juliflora*. L'interaction entre la salinité et l'inoculation microbienne a un effet significatif sur la TRE de *V. seyal* et les TRE de *S. senegal* et *P. juliflora*.

Tableau 25 : Test de significativité des effets de la salinité (NaCl), de l'inoculation microbienne (Inoc.) et de leur interaction (NaCl*Inoc) sur la teneur relative en eau et le potentiel hydrique foliaire (Ψ) des plants de *S. senegal*, *V. seyal* et *P. juliflora* cultivés en pépinière pendant 5 mois sur du sol non stérile.

Facteurs	<i>S. senegal</i>		<i>V. seyal</i>		<i>P. juliflora</i>	
	TRE	Ψ	TRE	Ψ	TRE	Ψ
NaCl	S ($p < 0,0001$)					
Inoc	NS ($p = 0,298$)	NS ($p = 0,164$)	NS ($p = 0,134$)	NS ($p = 0,062$)	NS ($p = 0,521$)	S ($p < 0,0001$)
NaCl*Inoc	NS ($p = 0,385$)	S ($p = 0,037$)	S ($p < 0,0001$)	NS ($p = 0,073$)	NS ($p = 0,943$)	S ($p < 0,0001$)

S = Significatif ; NS = non significatif au seuil de 5 % selon le test de Student-Newman-Keuls
 Les données de la salinité correspondent à la combinaison de toutes les inoculations microbiennes.
 Les données des inoculations microbiennes correspondent à la combinaison de toutes les doses de NaCl.

Le tableau 26 montre les effets individuels de la salinité et de l'inoculation microbienne sur la TRE et le Ψ des plants de *S. senegal*, *V. seyal* et *P. juliflora*. Les résultats ont montré que l'inoculation microbienne n'a aucun effet significatif sur la TRE des plants à l'exception des plants de *V. seyal* cultivés à 15 g/l et inoculés avec les rhizobia et les CMA. L'inoculation avec les CMA de même que la double inoculation ont augmenté significativement le Ψ en valeur absolue des plants de *P. juliflora* cultivés en présence de NaCl.

Tableau 26 : Teneur relative en eau (%) et potentiel hydrique foliaire (MPa) des plants de *S. senegal*, *V. seyal* et *P. juliflora* cultivés en pépinière pendant 5 mois en conditions salines (0, 5, 10, 15 g/l NaCl) et inoculés avec des rhizobia et des CMA sur sol non stérile

Espèces	Traitement	Concentrations de NaCl (g/l)							
		0		5		10		15	
		TRE	Ψ	TRE	Ψ	TRE	Ψ	TRE	Ψ
<i>S. senegal</i>	Témoins	78,8a	-0,75a	88,0a	-1,33a	86,4a	-1,60a	90,0a	-1,70a
	Rhizobia	84,4b	-0,68a	90,6a	-1,25a	89,9a	-1,57a	90,1a	-1,68a
	CMA	89,9c	-0,77a	91,7a	-1,33a	89,7a	-1,62a	92,8a	-1,63a
	Rhizo+CMA	90,6c	-0,67a	89,0a	-1,32a	88,8a	-1,47a	89,7a	-1,63a
<i>V. seyal</i>	Témoins	88,7a	-0,57b	83,0a	-1,28a	85,5a	-1,57a	47,7a	-2,33a
	Rhizobia	86,7a	-0,68a	81,6a	-1,37a	86,2a	-1,95a	48,9a	-2,52a
	CMA	88,0a	-0,77a	82,6a	-1,45a	78,5a	-1,53a	47,4a	-2,87a
	Rhizo+CMA	87,0a	-0,67a	82,5a	-1,47a	82,9a	-1,55a	82,1b	-2,67a
<i>P. juliflora</i>	Témoins	90,9a	-0,72a	86,3a	-1,03b	84,9a	-1,65b	81,3a	-2,08b
	Rhizobia	91,2a	-0,72a	88,1a	-1,37a	87,3a	-1,72b	83,6a	-2,12b
	CMA	88,8a	-0,73a	87,5a	-1,37a	85,5a	-1,90a	83,6a	-2,33a
	Rhizo+CMA	89,3a	-0,73a	88,0a	-1,47a	87,7a	-1,87a	82,4a	-2,42a

Pour chaque espèce, les valeurs d'une colonne suivies par les mêmes lettres ne sont pas significativement différentes au seuil de 5% selon le test de Newmann et Keuls

III.1.3. Etude de l'effet de l'inoculation microbienne sur la nodulation et la mycorhization des espèces en conditions de stress salin

Une nodulation a été observée chez tous les plants inoculés ou non (Tableau 27). Par contre, en raison de la dégénérescence de nodosités au moment de la récolte, leur nombre exact n'a pas pu être déterminé. Seuls quelques débris de nodosités ont été retrouvés sur les racines des plants de *S. senegal*, *V. seyal* et *P. juliflora*. Aucune nodulation n'a été observée chez les plants témoins cultivés en présence de fortes concentrations de NaCl (10 et 15 g/l). La meilleure nodulation a été obtenue chez les plants inoculés avec les rhizobia et les plants doublement inoculés pour toutes les concentrations de NaCl.

Tableau 27 : Nodulation (N) et taux de mycorhization (TM %) des plants de *S. senegal*, *V. seyal* et *P. juliflora* cultivés en pépinière pendant 5 mois en conditions salines (0, 5, 10, 15 g/l NaCl) et inoculés avec des rhizobia et des CMA sur sol non stérile

Espèces	Traitements	Concentrations de NaCl (g/l)							
		0		5		10		15	
		N	TM	N	TM	N	TM	N	TM
<i>S. senegal</i>	Témoin	+	19a	-	05a	-	0a	-	0a
	Rhizobia	+++	23b	++	13b	+	05a	+	02a
	CMA	++	36c	-	29c	-	18b	-	06b
	Rhizo+CMA	+++	47c	++	30c	++	24b	+	15c
<i>V. seyal</i>	Témoin	+	08a	+	05a	-	03a	-	0a
	Rhizobia	+++	37b	++	07a	+	04a	+	02a
	CMA	++	64c	+	40c	+	24b	-	9b
	Rhizo+CMA	+++	74c	++	44b	++	27b	+	13b
<i>P. juliflora</i>	Témoin	+	12a	+	9a	+	03a	-	0a
	Rhizobia	+++	36b	+++	15a	++	10a	+	5b
	CMA	++	85c	+	54b	+	36b	-	22c
	Rhizo+CMA	+++	88c	+++	55b	++	39b	+	27c

Pour chaque espèce, les valeurs d'une colonne suivies par les mêmes lettres ne sont pas significativement différentes au seuil de 5% selon le test de Newmann et Keuls

- = absence de nodosités, + = présence de nodosités

Les résultats ont montré une baisse du taux de mycorhization en rapport avec la concentration de NaCl (Tableau 27). Aucune mycorhization n'a été notée chez les plants non inoculés de *S. senegal* cultivés en présence de 10 et 15 g/l de NaCl et pour les plants de *V. seyal* et *P. juliflora* cultivés sous 15 g/l. L'inoculation microbienne augmente significativement le taux de mycorhization. Le meilleur taux de mycorhization a été obtenu avec l'inoculation avec les CMA et la double inoculation pour toutes les espèces et quelle que soit la concentration de NaCl.

III.2. Evaluation de l'effet combiné de l'inoculation microbienne et des coques d'arachide sur la tolérance à la salinité des espèces

III.2.1. Effet de l'inoculation microbienne et des coques d'arachide sur la croissance des plants en serre sous conditions de stress salin

Les résultats ont montré que l'inoculation microbienne, l'apport de coque d'arachide ou la combinaison inoculation coque d'arachide améliore la croissance (hauteur, diamètre au collet, biomasses aérienne et racinaire) (Tableaux 28 et 29) des plants de *S. senegal*, *V. seyal* et *P. juliflora* en conditions de stress salin. Aucun effet significatif de l'inoculation microbienne n'a été noté sur le diamètre au collet des plants cultivés en l'absence (0 g/l) et en présence de faible concentration de NaCl (5 g/l).

Tableau 28 : Hauteur et diamètre au collet des plants de *S. senegal*, *V. seyal* et *P. juliflora* cultivés en serre pendant 4 mois en conditions salines (0, 5, 10, 15 g/l NaCl), doublement inoculés avec des rhizobias et des CMA et/ou amendés avec des coques d'arachide

Espèces	Traitements	Diamètre au collet (mm/plant)				Hauteur (cm/plant)			
		0	5	10	15	0	5	10	15
<i>S. senegal</i>	Témoins	4,30a	4,65a	3,73a	3,41a	35,3a	22,3a	14,3a	12,3a
	Inoculés	4,27a	4,46a	4,71b	4,12b	36,0a	26,3a	18,3b	20,0ab
	Coques	6,23b	6,26b	6,20c	4,58b	58,3b	33,0b	25,0c	21,3ab
	Ino+Coques	5,96b	6,39b	6,79c	7,72b	57,0b	39,0b	27,0c	25,0b
<i>V. seyal</i>	Témoins	2,89a	3,19a	3,00a	2,30a	46,0a	33,0a	19,0a	16,3a
	Inoculés	3,40a	3,04a	3,00a	2,35a	49,3a	32,0a	26,7a	21,7a
	Coques	4,06ab	3,88b	3,69a	2,99ab	67,3b	53,3b	46,3b	29,0b
	Ino+Coques	5,03b	4,00b	4,11b	3,27b	72,3b	49,0b	47,3b	31,3b
<i>P. juliflora</i>	Témoins	3,29a	3,12a	2,07a	2,36a	50,3a	49,0a	30,0a	31,7a
	Inoculés	4,49b	4,05a	3,40b	3,99b	58,0a	56,0b	46,0b	49,0a
	Coques	5,68c	5,74a	5,01c	4,63b	91,7b	97,7c	102,7c	83,0c
	Ino+Coques	5,68c	5,52a	5,35c	4,61b	98,3b	96,3c	96,3c	65,3b

Pour chaque concentration de NaCl et pour chaque espèce, les valeurs d'une colonne suivies par les mêmes lettres ne sont pas significativement différentes au seuil de 5% selon le test de Newmann et Keuls

A 10 et 15 g/l de NaCl, l'inoculation microbienne, les coques seules ou la combinaison inoculation et coques ont amélioré significativement le diamètre au collet des plants de *S. senegal* et *P. juliflora*. A 15 g/l, la combinaison inoculation et coques a permis une augmentation de 126% et 95% respectivement chez les plants de *S. senegal* et *P. juliflora*. Pour *V. seyal*, seule la combinaison inoculation et coques a un effet significatif avec une augmentation de 37% et 42% respectivement à 10 et 15 g/l. La même tendance a été observée sur la hauteur des plants. Nos résultats ont également montré qu'aucune différence significative n'a été notée entre les coques seules et la combinaison inoculation et coques sur le diamètre et la hauteur des plants quelle que soit la concentration de NaCl.

Le tableau 29 montre les poids secs des parties aériennes et racinaires des plants inoculés et amendés avec des coques d'arachide.

Tableau 29 : Biomasse aérienne sèche (**BAS**) et biomasse racinaire sèche (**BRS**) des plants de *S. senegal*, *V. seyal* et *P. juliflora* cultivés en serre pendant 4 mois en conditions salines (0, 5, 10, 15 g/l NaCl), doublement inoculés avec des rhizobia et des CMA et/ou amendés avec des coques d'arachide

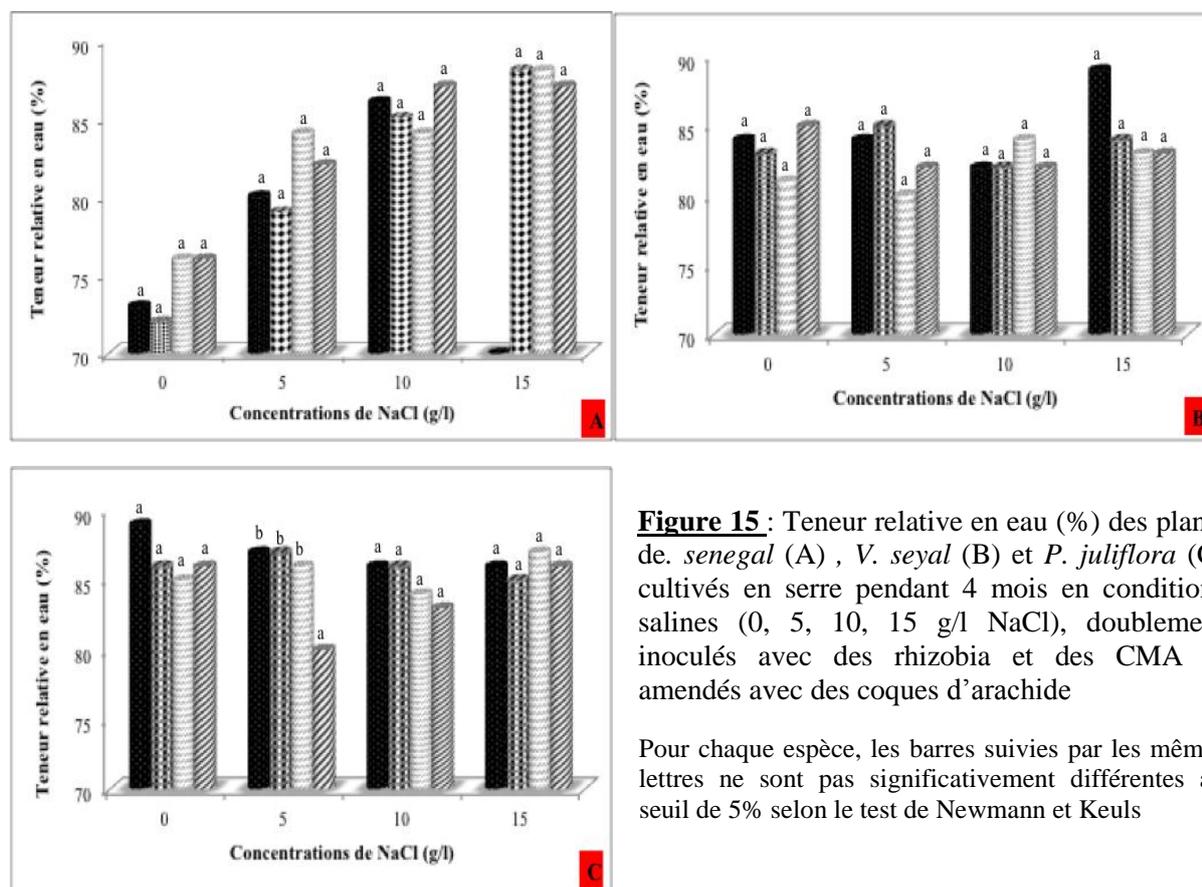
Espèces	Traitements	Concentrations de NaCl (g/l)							
		0		5		10		15	
		BAS	BRS	BAS	BRS	BAS	BRS	BAS	BRS
<i>S. senegal</i>	Témoins	1,53a	1,72a	0,85a	1,15a	0,41a	0,69a	0,30a	0,35a
	Inoculés	1,57a	1,95a	0,98a	1,42a	0,74b	1,00ab	0,70b	0,94b
	Coques	4,04b	2,45a	2,44b	1,65a	1,58c	1,47c	0,86bc	0,69ab
	Ino+Coque	3,93b	2,30a	2,22b	1,86a	1,33c	1,21bc	1,10c	0,74ab
<i>V. seyal</i>	Témoins	2,15a	3,31a	0,92a	2,25a	0,32a	0,94a	0,23a	0,69a
	Inoculés	2,74a	4,10ab	1,88b	2,69a	0,57a	1,48a	0,52b	0,62a
	Coques	3,96b	5,09ab	2,19c	3,62b	1,80b	3,17b	1,17c	1,85b
	Ino+Coque	5,07c	5,78b	2,32c	4,87c	1,83b	3,88b	1,09c	1,64b
<i>P. juliflora</i>	Témoins	1,97a	0,82a	0,99a	0,68a	0,50a	0,52a	0,40a	0,45a
	Inoculés	3,60b	1,42ab	2,97b	0,77a	2,64b	0,69b	2,07b	0,67a
	Coques	9,89c	1,81ab	10,32c	1,76b	7,32c	1,28b	5,52c	1,15b
	Ino+Coque	10,1c	2,28b	9,73c	1,78b	8,33c	1,30b	5,87c	0,88b

Pour chaque concentration de NaCl et pour chaque espèce, les valeurs suivies par les mêmes lettres ne sont pas significativement différentes au seuil de 5% selon le test de Newmann et Keuls

A l'image du diamètre au collet et de la hauteur des plants, l'inoculation microbienne seule, les coques seules et la combinaison inoculation et coques améliorent significativement la biomasse aérienne sèche des plants de *S. senegal*, *V. seyal* et *P. juliflora* cultivés sous stress salin. Même s'il n'y a pas une différence significative, la meilleure biomasse aérienne a été généralement obtenue avec la combinaison inoculation et coques d'arachide. A 15 g/l, les coques seules et leur combinaison avec l'inoculation microbienne ont augmenté la biomasse aérienne, respectivement de 115 % et 175 % chez *S. senegal*, de 409 % et 374 % chez *V. seyal*, de 1280 % et 1368 % chez *P. juliflora*.

III.2.2. Effet de l'inoculation microbienne et des coques d'arachide sur la teneur relative en eau des plants en serre

La figure 15 (A, B, C) montre les teneurs relatives en eau (TRE) des plants de *S. senegal*, *V. seyal* et *P. juliflora* inoculés et/ou amendés avec des coques d'arachide et cultivés sous stress salin pendant 4 mois. Les résultats ont montré que l'inoculation, les coques seules et leur combinaison n'ont aucun effet significatif sur la TRE à l'exception des plants de *P. juliflora* cultivés en présence de 5 g/l de NaCl où les plants ayant reçu la combinaison inoculation et coques ont une TRE significativement plus faible celles des autres traitements (Fig. 15C).



III.2.3. Effet de l'inoculation microbienne et des coques d'arachide sur la nodulation et la mycorhization des plants en serre

Le tableau 30 montre le nombre moyen de nodosités et le taux de mycorhization des plants de *S. senegal*, *V. seyal* et *P. juliflora* inoculés et amendés avec des coques d'arachide et cultivés sous stress salin pendant 4 mois. Le nombre de nodosités de même que le taux de mycorhization sont plus élevés respectivement chez les plants inoculés, les plants inoculés et amendés avec les coques et les plants amendés pour toutes les espèces et quelle que soit la concentration de NaCl. Même si aucune différence significative n'a été notée, la nodulation et la mycorhization sont plus importantes chez les plants inoculés comparés aux plants inoculés et amendés avec des coques.

Tableau 30 : Nombre de nodosités et taux de mycorhization des plants de *S. senegal*, *V. seyal* et *P. juliflora* cultivés en serre pendant 4 mois en conditions salines (0, 5, 10, 15 g/l NaCl), doublement inoculés avec des rhizobia et des CMA et amendés avec des coques d'arachide

Espèces	Traitements	Nombre de nodosités				Taux de mycorhization (%)			
		0	5	10	15	0	5	10	15
<i>S. senegal</i>	Témoins	05a	0a	0a	0a	10a	03a	03a	0a
	Inoculés	30b	8c	3b	1b	35c	27c	17b	14c
	Coques	11a	3b	1a	1b	24b	16b	09a	04b
	Ino+Coques	27b	6bc	4b	1b	30bc	25c	19b	13c
<i>V. seyal</i>	Témoins	4a	0a	0a	0a	07a	02a	0a	0a
	Inoculés	17b	10c	4b	2b	38c	28c	23c	16c
	Coques	09a	4b	2a	1b	17b	14b	07b	05b
	Ino+Coques	15b	7bc	7b	2b	37c	28c	20c	14c
<i>P. juliflora</i>	Témoins	6a	5a	0a	0a	12a	05a	04a	0a
	Inoculés	26b	16b	10c	3b	70b	57c	37b	26c
	Coques	10a	9a	5b	2b	20a	18b	10a	07b
	Ino+Coques	24b	13b	9bc	4b	61b	46c	32b	22c

Pour chaque concentration de NaCl et pour chaque espèce, les valeurs suivies par les mêmes lettres ne sont pas significativement différentes au seuil de 5% selon le test de Newmann et Keuls.

Chaque valeur représente la moyenne de 4 répétitions

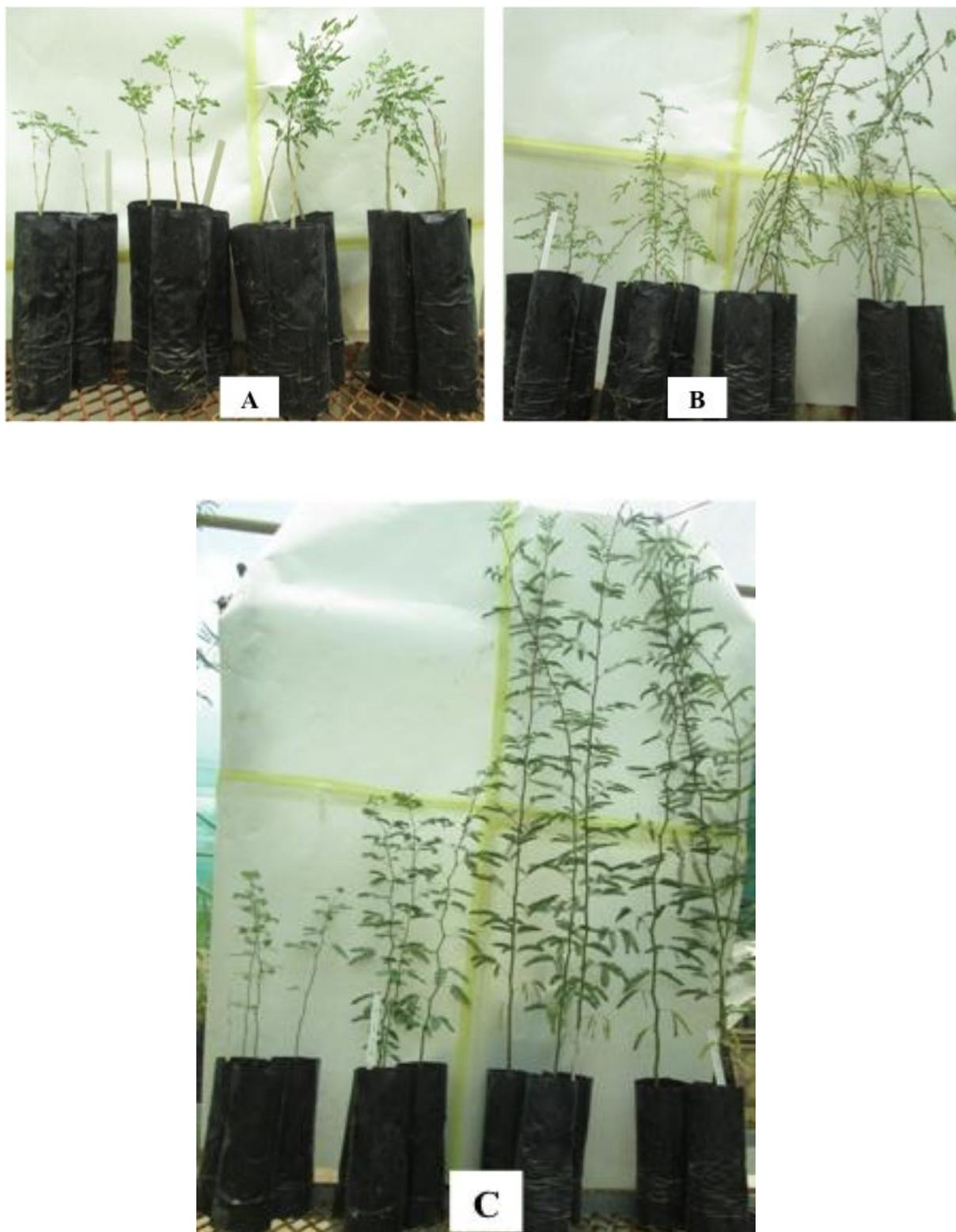


Planche photographique 21 : Plants de *S. senegal* (A), de *V. seyal* (B) et *P. juliflora* (C) cultivés en serre pendant 4 mois en présence de 15 g/l NaCl, doublement inoculés avec des rhizobia et des CMA et amendés avec 6 T/ha de coques d'arachide var 73-33

III.2.4. Effet de l'inoculation microbienne et des coques d'arachide sur la croissance des plants en milieu réel

La figure 16 montre le taux de survie des plants 4 mois après transplantation. Ce taux est supérieur à 55% pour tous les traitements et pour toutes les espèces. Toutefois, il est plus élevé chez *P. juliflora* comparé à *S. senegal* et *V. seyal*. Chez *S. senegal* et *V. seyal*, aucune différence significative n'a été notée entre les plants des différents traitements et ceux témoins. Par contre chez *P. juliflora*, le taux de survie des plants inoculés et/ou amendés avec des coques un taux significativement plus élevé que celui des plants témoins. Il est de 100 %, 94 % et 100 % respectivement chez les plants inoculés, les plants amendés avec les coques et les plants inoculés et amendés.

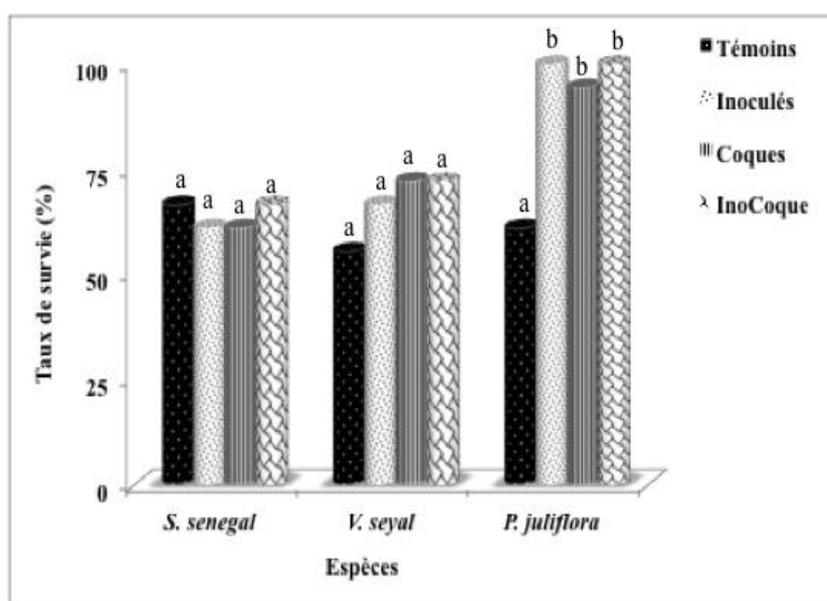


Figure 16 : Taux de survie des plants de *S. senegal*, *V. seyal* et *P. juliflora* 4 mois après transplantation (Décembre 2015) à Sadioga

Pour chaque espèce, les barres suivies par les mêmes lettres ne sont pas significativement différentes au seuil de 5% selon le test de Newman-Keuls.

La hauteur et le diamètre au collet des plants au moment de la plantation (août 2015) et 4 mois après (décembre 2015) sont présentés dans le tableau 31. Les tendances obtenues en pépinière sont maintenues jusqu'à 4 mois après plantation. Les coques seules et la combinaison inoculation microbienne et coques ont amélioré significativement la hauteur et le diamètre au collet des plants. Cependant, aucune différence significative n'a été notée entre ces deux traitements. A l'image des résultats obtenus en serre, l'inoculation microbienne seule n'a aucun effet significatif sur ces variables.

Tableau 31 : Hauteur, diamètre au collet et taux de croissance des plants de *S. senegal*, *V. seyal* et *P. juliflora* juste après plantation (août 2015) et 4 mois après plantation dans notre site d'étude (décembre 2015)

Espèces	Traitements	Hauteur (cm/plant)			Diam. col. (mm/plant)		
		JAP	4 MAP	TC	JAP	4 MAP	TC
<i>S. senegal</i>	Témoins	27,4a	30,6a	11,7	3,47a	5,62a	62,0
	Inoculés	23,8a	28,7a	20,6	3,50a	6,11a	74,6
	Coques	35,6b	42,7b	19,9	4,47b	6,67ab	49,2
	Ino+Coques	34,9b	43,3b	24,1	4,91b	8,08b	64,6
<i>V. seyal</i>	Témoins	28,8a	29,9a	3,8	2,70a	3,74a	38,5
	Inoculés	31,5a	32,9a	4,4	2,88a	4,32ab	50,0
	Coques	44,1b	46,5b	5,4	3,61a	5,24ab	45,2
	Ino+Coques	43,2b	47,3b	9,5	3,25a	5,72b	76,0
<i>P. juliflora</i>	Témoins	28,5a	33,8a	18,6	2,32a	3,09a	33,2
	Inoculés	37,1a	43,5a	17,3	3,30b	4,67a	41,5
	Coques	67,1b	83,3b	24,1	5,15c	6,87b	33,4
	Ino+Coques	60,9b	84,7b	39,1	4,79c	6,65b	38,8

Pour chaque concentration de NaCl et pour chaque espèce, les valeurs suivies par les mêmes lettres ne sont pas significativement différentes au seuil de 5% selon le test de Newmann et Keuls. Chaque valeur représente la moyenne de 3 répétitions (3 blocs).

JAP = juste après plantation ; **4 MAP** = 4 mois après plantation ; **TC** = Taux de croissance

Les résultats ont également montré que l'effet de l'inoculation, des coques et de leur combinaison sur le taux de croissance dépend de la variable considérée. Il est plus élevé chez les plants inoculés et amendés avec les coques. Le taux de croissance du diamètre au collet est plus important que celui de la hauteur pour toutes les espèces et quel que soit le traitement. Il est également important de noter que le taux croissance de la hauteur est plus élevé chez *P. juliflora* suivie de *S. senegal*. Par contre, le taux croissance du diamètre au collet est plus élevé chez *S. senegal* suivie de *V. seyal*.

IV. Discussion

Le premier objectif de ce chapitre était de sélectionner un inoculum microbien capable d'améliorer la tolérance à la salinité de *S. senegal*, *V. seyal* de *P. juliflora*. Nos résultats ont montré un effet positif de l'inoculation microbienne avec des rhizobia et/ou des CMA sur la croissance des plants de *S. senegal*, *V. seyal* et *P. juliflora* cultivés sous stress salin. Toutefois, cet effet dépend du type du microorganisme et du niveau de salinité. Des résultats similaires ont été rapportés dans plusieurs travaux (Azcón et Al-Atrash, 1997 ; Diouf *et al.*, 2005). Cependant, la meilleure croissance a été toujours obtenue avec la double inoculation. Ce résultat concorde parfaitement avec les travaux de Barea *et al.* (1992), Requena *et al.* (1997), Ben khaled *et al.* (2003), Diouf *et al.* (2005), Coba de la Peña et Pueyo (2011). L'amélioration de la croissance des plantes en présence de sel par la double inoculation microbienne (rhizobia + CMA) s'expliquerait par une meilleure absorption hydrominérale entraînant ainsi une augmentation des activités physiologiques et biochimiques de la plante (Hatimi *et al.*, 1997 ; Ruiz-Lozano *et al.*, 2001 ; Requena *et al.*, 2001). Toutefois, il est important de souligner que cette double inoculation peut conduire à un antagonisme et à une chute de la croissance comparativement aux cas où ces microorganismes sont appliqués séparément (Bethlenfalvay *et al.*, 1985).

Il est admis que l'inoculation microbienne en particulier mycorhizienne améliore la nutrition hydrique des plantes (Requena *et al.*, 2001). Toutefois, nos résultats ont montré que l'inoculation microbienne n'a pas d'effet positif significatif sur la teneur relative en eau des plants. Cette absence d'effet s'expliquerait par une forte transpiration des plants inoculés. En effet, l'inoculation microbienne a augmenté la biomasse foliaire entraînant ainsi une augmentation de la surface transpiratoire et donc favorise une baisse de la teneur en eau des plants. Des études ont montré que les fortes teneurs en eau sont généralement dues à une faible transpiration (Rodríguez *et al.*, 2001). Nos résultats ont montré que l'inoculation avec les CMA et la double inoculation ont rendu de plus en plus négatif le potentiel hydrique des plants de *P. juliflora* cultivés en présence 10 et 15 g/l de NaCl. Cette situation pourrait s'expliquer d'une part par une forte rétention de l'eau due à une accumulation de proline et d'autre par une faible disponibilité en eau dans les cellules due à une sécheresse physiologique provoquée par le stress salin comme le montrent les résultats du chapitre II.

L'inoculation microbienne améliore la nodulation et la mycorhization des plants de *S. senegal*, *V. seyal* et *P. juliflora*. La nodulation est plus importante chez les plants doublement

inoculés. Des résultats similaires ont été par Diouf *et al.* (2005) sur *Acacia auriculiformis* et *A. mangium* en conditions salines. La senescence des nodosités observée dans notre étude s'expliquerait par la durée de l'expérimentation. En effet, l'expérimentation a duré 5 mois ; ce qui peut conduire à la dégénérescence des nodosités. A l'image de la nodulation, nos résultats ont montré que le taux de mycorhization est plus important chez les plants doublement inoculés. Des résultats ont été obtenus chez *A. auriculiformis* et *A. mangium* (Diouf *et al.*, 2005). La réduction de la fréquence et de l'intensité de mycorhization en présence de fortes concentrations de NaCl dans le milieu serait liée à des changements physiologiques de la plante hôte (Juniper et Abbott, 1993) et au degré de sensibilité de la souche au sel. En effet, en présence de fortes concentrations en sel (10 et 15 g/l NaCl), la chute de l'intensité de mycorhization a probablement été accompagnée d'une réduction de la propagation du champignon. En effet, la sensibilité de la croissance des hyphes fongiques au sel entraîne une diminution de leur propagation, de la colonisation mycorhizienne (Mc Millen *et al.*, 1998, Ruiz-Lozano et Azcón, 2000) et une perte de la viabilité des hyphes qui peut s'avérer critique pour la survie et la réussite de l'installation de la mycorhization (Dixon *et al.*, 1993). La nodulation et la mycorhization observées chez les plants témoins cultivés en l'absence et en présence de faibles concentrations de NaCl, seraient liées à la présence de souches de rhizobia et de champignons indigènes dans le sol. Cependant, le taux de nodulation et de mycorhization reste faible comparativement aux plants inoculés. Ce qui prouve leur faible infectivité comparée aux souches inoculées.

L'objectif principal de ce chapitre était d'évaluer l'effet combiné de l'inoculation microbienne (rhizobia + CMA) et l'apport des coques d'arachide *var* 73-33 sur la tolérance à la salinité des plants de *S. senegal*, *V. seyal* et *P. juliflora* cultivés en serre et en milieu naturel. Tout d'abord, nos résultats ont montré que l'inoculation microbienne seule, les coques d'arachide seules et leur combinaison améliorent la croissance (hauteur, diamètre au collet, biomasses aérienne et racinaire) des plants de *S. senegal*, *V. seyal* et *P. juliflora* cultivés sous conditions salines en serre et en milieu réel. Toutefois, les effets dépendent de l'espèce, de la concentration de NaCl et de la variable considérée. Aucun effet significatif de l'inoculation microbienne seule n'a été noté sur la hauteur et le diamètre au collet aussi bien en serre qu'en milieu naturel. Par contre, un effet significatif a été observé sur la biomasse des parties aériennes des plants cultivés en serre. Ce résultat suggère que l'effet de l'inoculation microbienne est plus marqué sur les autres variables de la croissance (ramifications, feuilles,...) des espèces étudiées. Son effet significatif sur la biomasse des parties aériennes

s'expliquerait par une meilleure nutrition hydrominérale. En effet, les rhizobia améliorent la nutrition azotée (Peoples *et al.*, 1995 ; Dixon et Wheeler, 1996 ; Ollivier *et al.*, 2011) et les CMA la nutrition hydrique et phosphatée (Parniske, 2008 ; Smith et Read, 2008).

Nos résultats ont également montré que l'inoculation microbienne seule, les coques seules et leur combinaison améliorent significativement la nodulation et la mycorhization des plants de *S. senegal*, *V. seyal* et *P. juliflora* cultivés en conditions salines. Toutefois, même si une différence significative n'a pas été notée, le nombre de nodosités et le taux de mycorhization sont plus élevés chez les plants inoculés que chez ceux inoculés puis amendés avec les coques. Cette situation s'expliquerait par une légère inhibition de l'efficacité des symbioses microbiennes par l'apport des coques d'arachide. En effet, il est connu que les teneurs assez élevées du sol en éléments nutritifs tels que l'azote et le phosphore, réduisent la nodulation (Afza *et al.*, 1987 ; Huss-Danell, 1997 ; Hellsten et Huss-Danell, 2001 ; Gentili et Huss-Danell, 2002, 2003) et la mycorhization des plantes (Schubert et Hayman, 1986 ; Koide, 1991). Or les résultats obtenus dans le chapitre III ont montré une augmentation de la teneur en éléments nutritifs des sols amendés avec les coques et que la meilleure nodulation et mycorhization ont été obtenues avec la dose 4 T/ha en présence de sel.

La combinaison de l'inoculation microbienne (rhizobia + CMA) et des coques d'arachide *var* 73-33 a permis la meilleure croissance des plants de *S. senegal*, *V. seyal* et *P. juliflora* cultivés en serre et en milieu naturel sous conditions salines. Toutefois, une différence significative n'a pas été notée entre les plants amendés avec les coques seules et ceux inoculés et amendés. L'effet positif de cette combinaison serait dû à une amélioration des propriétés chimiques du sol par les coques d'arachide d'une part et de la nutrition hydrominérale des plants par les symbioses microbiennes d'autre part. En effet, les résultats ci-dessus ont montré que la double inoculation (rhizobia + CMA) améliore la nodulation, la mycorhization et la croissance des plants de *S. senegal*, *V. seyal* et *P. juliflora* cultivés en conditions de stress salin. De même, les résultats du chapitre III ont montré que les coques d'arachide *var* 73-33 augmentent les teneurs en carbone, azote et phosphore totaux et diminuent la salinité du sol. Cette combinaison permettrait alors une bonne croissance des plantes sous conditions salines.

V. Conclusion et perspectives

Nos résultats ont montré que l'inoculation microbienne avec des souches sélectionnées améliore la croissance, l'état hydrique, la nodulation et la mycorhization des plants de *S.*

senegal, *V. seyal* et *P. juliflora* cultivés en présence de sel. Toutefois, la double inoculation (rhizobia + CMA) a permis d'obtenir la meilleure croissance des plants en condition de stress salin. Cet effet positif résulterait d'une amélioration de la nutrition hydrominérale (eau, N, P,...) des plants. La combinaison de l'inoculation microbienne (rhizobia + CMA) et l'apport des coques d'arachide améliore significativement la hauteur, le diamètre au collet, les biomasses aérienne et racinaire, la nodulation et la mycorhization des plants de *S. senegal*, *V. seyal* et *P. juliflora* cultivés sous conditions salines en serre et en milieu réel. Aucune différence significative n'a été notée entre les plants amendés avec les coques seules et ceux inoculés et amendés. Toutefois, la meilleure croissance et le meilleur taux de survie ont été toujours obtenus avec la combinaison inoculation microbienne et coques d'arachide. Néanmoins, il s'avère nécessaire de suivre le taux de survie et la croissance des plants en milieu réel pendant plusieurs années pour pouvoir évaluer efficacement l'effet de cette combinaison sur la tolérance à la salinité des espèces.

DISCUSSION GENERALE

Discussion générale

Ces actions de recherche ont contribué ainsi à améliorer les stratégies de récupération et de valorisation de ces terres en associant la lutte mécanique à la lutte biologique. Cependant, même si des réussites ont été obtenues, beaucoup d'échecs ont été notés du fait du manque de suivi des plantations et des ouvrages mais également et de la méconnaissance des niveaux de tolérance à la salinité des espèces utilisées, d'une absence de stratégies d'amélioration des capacités intrinsèques à tolérer la salinité des espèces et d'amélioration des propriétés physiques, chimiques et microbiologiques des sols salés. C'est pourquoi dans notre étude, nous avons d'abord cherché à connaître les niveaux et les mécanismes de tolérance à la salinité de trois espèces forestières à usages multiples telles que *S. senegal*, *V. seyal* et *P. juliflora*. Pour améliorer les propriétés du sol et la croissance des plantes, nous avons déterminé la dose optimale de coques d'arachide de la variété 73-33 qui est la plus cultivée dans le bassin arachidier où la salinisation des terres est très importante. Ensuite, nous avons évalué l'effet combiné l'inoculation microbienne (rhizobia + CMA) et des coques d'arachide pour améliorer leurs capacités intrinsèques à tolérer le sel et les propriétés des sols salés.

1. *S. senegal* et *V. seyal* : des essences forestières susceptibles d'être utilisées pour la revégétalisation des sols affectés par la salinité comme *P. juliflora*

S. senegal et *V. seyal* n'ont pas les mêmes niveaux de tolérance au sel *P. juliflora* (Maliwal, 1999 ; Basavaraja *et al.*, 2007) même si *V. seyal* est rencontrée parfois dans des zones salées (Diouf *et al.*, 2010 ; Fall, 2016). *S. senegal* est toujours décrite comme une espèce adaptée à la sécheresse car généralement rencontrée dans les zones sèches. Si certains travaux ont mis en évidence une relation entre les propriétés germinatives des graines et l'écologie de la plante entière (Saint-Clair, 1976 ; Fady, 1992), l'aptitude à germer en condition de stress hydrique ou salin n'est donc pas un critère déterminant de la répartition écologique des taxons (Sharma, 1973 ; Grouzis *et al.*, 1986 ; Kayani *et al.*, 1990 ; Qi et Redman, 1993). Toutefois, la connaissance de la tolérance de la salinité au moment de la germination est une information utile mais non suffisante pour expliquer la distribution des espèces et leur développement dans les milieux salés (Neffati, 1994). Nos résultats ont montré que *S. senegal* et *V. seyal* présentent des taux de germination environ de 100% à 15 g/l de NaCl comme *P. juliflora*, or leurs graines ont été récoltées sur des individus présents sur sol non salé. Nos résultats ont également montré que *S. senegal* et *V. seyal* maintiennent une croissance relativement

importante avec des indices de tolérance de 79% et 47% respectivement à 10 g/l de NaCl. L'augmentation de la teneur en proline, la séquestration des ions Na^+ et Cl^- dans les feuilles des plants cultivés en présence de NaCl et la présence du gène NHX1 (Werner et Finkelstein, 1995 ; Apse *et al.*, 1999 ; Okuma *et al.*, 2000 ; Zhang et Blumwald, 2001 ; Zhang *et al.*, 2001) constituent des mécanismes largement utilisés par les végétaux pour tolérer la salinité. Les taux de survie de *S. senegal* et de *V. seyal* dans notre parcelle d'expérimentation avec une conductivité électrique de 14510 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et une salinité de 8,4 g/l de sels sont supérieurs à 55% et similaire à celui de *P. juliflora*. Des résultats similaires ont été obtenus dans les sols salés de Djilass (Région de Fatick, Département Fatick) où *S. senegal*, *V. tortilis/raddiana* et *V. seyal* ont toutes un taux de survie supérieur à 50% dix (10) ans après plantation (Ndour, 2006). Ces résultats suggèrent que *S. senegal* et *V. seyal* peuvent être utilisées pour la revégétalisation des sols salés.

2. La coque d'arachide : une matière organique efficace pour améliorer la fertilité des sols salés et la croissance des plantes en conditions salines

Notre étude a porté la détermination d'une dose optimale de coques capables d'améliorer la fertilité des sols salés et la croissance des plants de *S. senegal*, *V. seyal* et *P. juliflora* cultivés en conditions salines. Nos résultats ont montré que les coques d'arachide de la variété 73-33 augmentent significativement la croissance, les teneurs en chlorophylles et en proline des plants cultivés en conditions salines (0, 5, 10 et 15 g/l NaCl). Cette augmentation s'expliquerait par une amélioration de la nutrition minérale des plants et une baisse de la salinité des sols. En effet, l'apport des coques a permis d'augmenter les teneurs en carbone, azote et phosphore totaux, de la capacité d'échange cationique, l'activité microbienne totale des sols d'une part et de diminuer la conductivité électrique et de la salinité d'autre part. Il est connu que la coque d'arachide est riche en calcium (6,9 g/kg pour la variété 73-33) et les ions Ca^{2+} entrent en compétition avec les ions Na^+ ; ce qui favorisera leur lessivage et par la suite une baisse de la salinité du sol. Des résultats similaires avec d'autres types de matières organiques ont été obtenus par Tejada *et al.* (2006), Shaimaa *et al.* (2012), Diacono et Montemurro (2015).

Nos résultats ont montré que les faibles doses de coques (4 T/ha) stimulent la nodulation et la mycorhization des plants alors que les doses assez élevées (6 et 8 T/ha) les inhibent. En effet, ces dernières ont augmenté significativement les taux d'azote et de phosphore dans le sol. Or

il est admis que les faibles ainsi que les fortes teneurs en phosphore inhibent la mycorhization des plants (Amijee *et al.*, 1989; de Miranda *et al.*, 1989; Asimi *et al.*, 1980 ; Koide et Li, 1990 ; Koide, 1991). L'effet négatif de la forte dose de coques (8 T/ha) sur la croissance des plants cultivés en présence de forte concentration de NaCl (15 g/l), montre qu'il est important de prendre en compte le niveau de la salinité du sol à restaurer. Dans notre étude, 6 T/ha est la dose optimale pour améliorer la croissance de *S. senegal*, *V. seyal* et *P. juliflora* sous conditions salines et la fertilité des sols salés.

3. La combinaison inoculation microbienne et apport de coques d'arachide : une approche intégrée pour la restauration et la valorisation des sols salés

L'azote et le phosphore, deux éléments nutritifs essentiels pour la croissance, le développement et la productivité des plantes (Mengel et Kirkby, 1987; Mills et Jones, 1996; Slaton *et al.*, 2002; Sainio *et al.*, 2006), sont généralement en faible teneur dans les sols salés (Schmidhalter, 2005 ; Mahmood *et al.*, 2013; Fall, 2014). L'amélioration des capacités intrinsèques des plantes à tolérer la salinité d'une part et des propriétés physico-chimiques et microbiologiques des sols salés d'autre part, contribuerait à une meilleure gestion de la fertilité des sols salés et faciliter l'installation des espèces végétales. Dans notre étude, nous avons d'abord cherché à sélectionner l'inoculum microbien qui permet la meilleure croissance des plants en conditions de stress salin. Nos résultats ont montré que l'inoculation microbienne avec des rhizobia et/ou CMA augmente significativement la croissance, le nombre de nodosités et le taux de mycorhization des plants de *S. senegal*, *V. seyal* et *P. juliflora* cultivés sous stress salin. Toutefois, les meilleurs résultats ont été toujours obtenus avec la double inoculation rhizobia + CMA avec une augmentation de la biomasse aérienne des plants de 49%, 93% et 92% respectivement chez *S. senegal*, *V. seyal* et *P. juliflora* cultivés en présence de 15 g/l de NaCl comparés aux plants témoins. Ces résultats confirment ceux obtenus sur *A. mangium* et *A. auriculiformis* (Diouf *et al.*, 2005), le trèfle (*Trifolium alexandrinum* L.) (Ben Khaled *et al.*, 2003), la luzerne ou alfalfa (*Medicago sativa*) (Zhu *et al.*, 2016), le soja (Mizukami et Yamamoto, 1991). Par ailleurs, ils infirment ceux obtenus par Smith et Bowen (1979) et Bethlenfalvay *et al.* (1985) qui ont montré un effet négatif de la double inoculation sur la croissance des plantes. L'effet positif de la double inoculation s'expliquerait par une amélioration de la nutrition hydrominérale (eau, N, P) (Giri *et al.*, 2002; Tian *et al.*, 2004), de la production d'hormones de croissance (Grant *et al.*, 2001), des

processus physiologiques (Asghari *et al.*, 2005) et une protection des racines contre les parasites (Marulanda *et al.*, 2003).

Dans un deuxième temps, nous avons évalué l'effet combiné de la double inoculation et de l'apport des coques d'arachide de la variété 73-33 sur la tolérance à la salinité de *S. senegal*, *V. seyal* et *P. juliflora*. Nos résultats ont montré que cette combinaison augmente significativement la croissance, la nodulation, la mycorhization et le taux de survie en milieu réel des plants sur sols salés. Cette augmentation s'expliquerait d'une part par l'amélioration de la teneur en éléments nutritifs, de la baisse de la salinité des sols et d'autre part par l'amélioration de la nutrition hydrominérale par l'inoculation microbienne comme le montrent les résultats obtenus dans les chapitres II et III. Ce résultat indique que la revalorisation des sols salés par voie biologique nécessiterait en plus du choix des espèces végétales, d'une amélioration des propriétés chimiques, physiques et microbiologiques des sols et des capacités de tolérance à la salinité des espèces choisies.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Conclusion générale et perspectives

Au Sénégal, les méthodes de restauration des terres salées (mécaniques, chimiques, organiques, biologiques) sont généralement utilisées séparément dans la plupart des programmes ou projets. Or la combinaison de ces différentes technologies de restauration et de valorisation des terres salées a été recommandée comme une approche intégrée d'une gestion appropriée de ces terres. Ainsi, l'objectif global de cette thèse était d'évaluer les potentialités de restauration et de valorisation des terres salées au Sénégal en particulier dans la région de Fatick par la combinaison de méthodes agro-biologiques comme le reboisement avec des légumineuses ligneuses à usages multiples telles que *Senegalia senegal*, *Vachellia seyal* et *Prosopis juliflora* et l'amendement avec de la matière organique telle que la coque d'arachide. Le travail accompli avait trois objectifs spécifiques qui contribuent à atteindre cet objectif principal.

L'objectif du premier chapitre consistait à évaluer les niveaux et les mécanismes de tolérance à la salinité de *S. senegal*, *V. seyal* et *P. juliflora* pour leur bonne utilisation dans la revégétalisation des sols affectés par la salinité. Les résultats obtenus ont montré que la salinité affecte négativement la germination, la croissance les paramètres physiologiques (teneur en chlorophylles, K^+ , ...) des plants de *S. senegal*, *V. seyal* et *P. juliflora*. En revanche, elle entraîne une augmentation de l'accumulation de la proline, des ions Na^+ et Cl^- dans les feuilles des plants. Ces résultats ont également révélé que pour des concentrations de NaCl inférieures ou égales à 15 g/l, le taux de germination est proche de 100% et la croissance est relativement importante pour toutes les espèces. Toutefois, *P. juliflora* présente la meilleure tolérance à la salinité aussi bien au stade germination qu'à la croissance. Au stade germination, *V. seyal* présente une meilleure tolérance au sel par rapport à *S. senegal*. Par contre, cette dernière de meilleures aptitudes de croissance que *V. seyal*. L'accumulation de proline, des ions Na^+ et Cl^- dans les feuilles observée dans nos conditions expérimentales, suggère que ces espèces font de l'ajustement osmotique et de la séquestration des ions toxiques tel que le Na^+ pour se développer dans les milieux salés. La présence du gène NHX1 chez les trois espèces confirme leur capacité à séquestrer les ions Na^+ dans la vacuole. Il est important de noter que c'est la première fois qu'une telle étude a été réalisée sur les trois espèces.

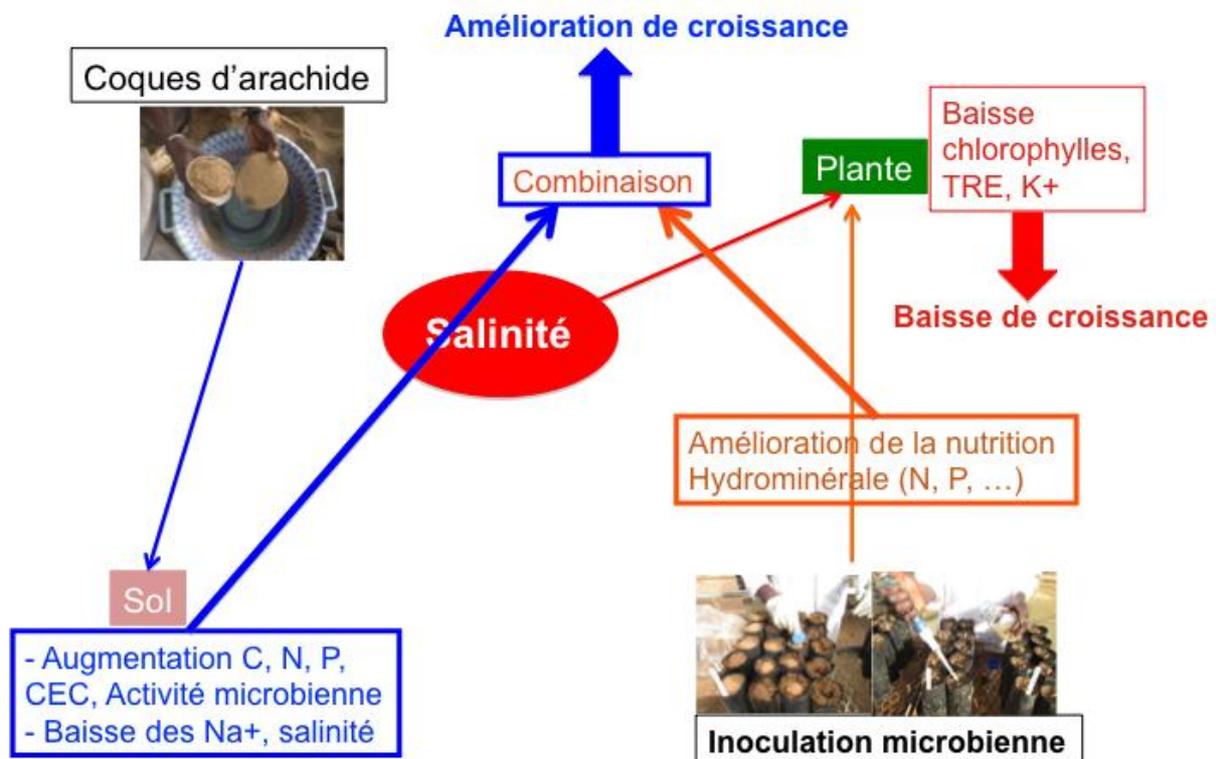
Dans le deuxième chapitre, nous cherchions à déterminer la dose optimale de coques d'arachide capable d'améliorer les caractéristiques chimiques et microbiologiques des sols

salés et la croissance de *S. senegal*, *V. seyal* et *P. juliflora* en conditions salines du sol en conditions de salinité. A notre connaissance, notre étude est la première à préciser des données sur l'effet de la coque d'arachide à la fois sur les propriétés physiques, chimiques et microbiologiques. Nos résultats ont montré que les coques comme amendement organique, améliorent significativement la croissance et les teneurs en chlorophylles et en proline des plants de *S. senegal*, *V. seyal* et *P. juliflora* et les caractéristiques chimiques (carbone, azote et phosphore totaux, capacité d'échange cationique, cations échangeables,...) et microbiologiques (activité microbienne totale) des sols salés. L'apport des coques réduit également la conductivité électrique et la salinité du sol. Les doses assez fortes (6 et 8 T/ha) inhibent la nodulation et la mycorhization des plants. En présence de forte concentration de NaCl (15 g/l), l'amendement avec 8 T/ha de coques inhibe la croissance des plants. A la lumière des résultats obtenus, la dose 6 T/ha a permis la meilleure la croissance des plants en conditions salines et une amélioration des propriétés chimiques et microbiologiques des sols salés. Cette dose peut être recommandée comme amendement organique seule ou en combinaison avec d'autres techniques pour la restauration des sols salés.

Le dernier chapitre avait pour objectif d'évaluer l'effet combiné de l'inoculation microbienne et de l'apport des coques d'arachide sur leur croissance en serre et en milieu réel sous conditions salines. Il s'agissait tout d'abord de sélectionner un inoculum microbien (rhizobia seuls ou CMA seuls ou double inoculation) pour améliorer la tolérance à la salinité des plants de *S. senegal*, *V. seyal* et *P. juliflora*. Nos résultats ont montré que l'inoculation microbienne avec des souches sélectionnées de rhizobia et de CMA améliore la croissance, l'état hydrique, la nodulation et la mycorhization des plants cultivés sous conditions salines. Toutefois, la double inoculation (rhizobia + CMA) a permis la meilleur croissance, les meilleures nodulation et mycorhization des plants quel que soit le niveau de salinité. Nos résultats ont également montré que l'inoculation microbienne, les coques d'arachide ou leur combinaison améliorent la hauteur, le diamètre au collet, les biomasses aérienne et racinaire, la nodulation et la mycorhization des plants cultivés sous conditions salines en serre et en milieu réel. Aucune différence significative n'a été notée entre les plants amendés avec les coques seules et ceux à la fois inoculés et amendés. Toutefois, la meilleure croissance a été obtenue avec la combinaison inoculation microbienne et coques d'arachides pour toutes les concentrations de NaCl.

Les travaux de recherches effectués dans cette thèse ont permis non seulement de connaître les niveaux et les mécanismes de tolérance à la salinité de *S. senegal*, *V. seyal* et *P. juliflora*, mais également de sélectionner l'inoculum microbien (rhizobia + CMA) le plus performant et déterminer la dose de coques d'arachide *var* 73-33 (6 T/ha) capables d'améliorer leur croissance sur milieux salés et la fertilité des sols salés et d'évaluer l'effet combiné de ces deux technologies (inoculation microbienne et coques d'arachide) sur la croissance de ces espèces en conditions salines.

Le schéma ci-dessous résume les différentes conclusions de notre étude.



En perspectives, pour une meilleure compréhension des mécanismes génétiques mis en jeu, les études moléculaires devront être poursuivies pour évaluer l'expression des gènes NHX1 et SOS1 dans les racines et les feuilles de *S. senegal*, *V. seyal* et *P. juliflora* sous différentes conditions salines. Le suivi du taux de survie et de la croissance des plants en milieu réel sur 2 à 4 ans permettra d'évaluer l'effet de la combinaison de l'inoculation microbienne (rhizobia + CMA) et des coques d'arachide (6 T/ha). Par ailleurs, il serait intéressant de mener une étude comparative du phosphogypse et de la coque d'arachide sur les caractéristiques chimiques, physiques et microbiologiques des sols salés et sur la croissance des espèces en serre et en milieu réel.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques

- Abari A., Nasr M.H., Hojjati M. et Bayat D. (2011).** Salt effects on seed germination and seedling emergence of two *Acacia* species. *African Journal of Plant Science*, **5**: 52-56.
- Adam G. et Duncan H. (2001).** Development of a sensitive and rapid method for the measurement of total microbial activity using fluorescein diacetate (FDA) in a range of soils. *Soil Biology and Biochemistry*, **33**: 943-951.
- Afza R., Hardarson G. et Zapata F. (1987).** Effect of delayed soil and foliar N fertilization on yield and N₂ fixation of soybean. *Plant and Soil*, **97**:361–368.
- Agarwal S. et Pandey V. (2004).** Antioxidant enzyme responses to NaCl stress in *Cassia angustifolia*. *Biology of Plant* **48**: 555-560.
- Ahmad R. et Chang M.H. (2002).** Salinity control and environmental protection through halophytes. *Journal of Drainage and Water Management*, **6**: 17-25.
- Akça Y. et Samsunlu E. (2012).** The effect of salt stress on growth, chlorophyll content, proline and nutrient accumulation, and K/Na Ratio in walnut. *Pakistan Journal of Botany*, **44**: 1513-1520.
- Al-Karaki G.N. (2000).** Growth of mycorrhizal tomato and mineral acquisition under salt stress. *Mycorrhiza*, **10**: 51-54.
- Al-Karaki G.N., Hammad R. et Rusan M. (2001).** Response of two tomato cultivars differing in salt tolerance to inoculation with mycorrhizal fungi under salt stress. *Mycorrhiza*, **11**: 43-47.
- Alam M.Z., Stuchbury T., Naylor R.E.L. et Rashid M.A. (2004).** Effect of salinity on growth of some modern rice cultivars. *Journal of Agronomy*, **3**: 1-10.
- Alazard D. et Becker M. (1985).** Stem and root nodulation in *Aeschynomene spp.* *Applied and Environmental Microbiology*, **50** : 732-734.
- Allen O.N. et Allen E.K. (1981).** The leguminosae: A source book of characteristic, uses and nodulation. The University of Wisconsin Press, Madison.
- Allen E.B. et Cunningham G.L. (1983).** Effects of vesicular arbuscular mycorrhizae on *Distichlis spicata* under three salinity levels. *New Phytologist*, **93**: 227-236.
- Amijee F., Tinker P.B. et Stribley D.P. (1989).** The development of endomycorrhizal root systems. VII. A detailed study of effects of soil phosphorus on colonization. *New Phytologist*, **111**: 435-446.
- Anjum R., Ahmed A., Rahmatullah M., Jahangir et Yousif M. (2005).** Effect of soil salinity/sodicity on the growth and yield of different varieties of cotton. *International Journal of Agricultural Biology*, **4**: 606–608.

- Anonyme (2006).** Conférence électronique sur la salinisation: Extension de la salinisation et Stratégies de prévention et réhabilitation. Organisée et coordonnée par: IPTRID du 6 février au 6 Mars 2006, pp. 20.
- Apse M.P., Aharon G.S., Snedden W.A., Blumwald E. (1999).** Salt tolerance conferred by overexpression of a vacuolar Na⁺/H⁺ antiport in arabidopsis, *Science*, **285** : 1256–1258.
- Arbonnier M. (2002).** Arbres, arbustes et lianes des zones sèches d'Afrique de l'Ouest. 2èed. Montpellier : CIRAD - MNHN.
- Asghari H.R., Marschner P., Smith S.E. et Smith F.A. (2005).** Growth response of *Atriplex nummularia* to inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi at different salinity levels. *Plant and Soil*, **373**: 245-256.
- Ashraf M.Y. et Bhatti A.S. (2000).** Effect of salinity on growth and chlorophyll content of Rice. *Pakistan Journal of Scientific and Industrial Research*, **43**: 130-131.
- Ashrah M. (1994).** Breeding for salinity tolerance in plants. *Critical Review of plant Science*, **13**: 17-42.
- Asimi S., Gianinazzi-Pearson V. et Gianinazzi S. (1980).** Influence of increasing soil phosphorus levels on interactions between vesicular-arbuscular mycorrhizae and Rhizobium in soybeans. *Canadian Journal of Botany*, **58**: 2200-2205.
- Asmalodhi M., Arshad F.A. et Sajjad M.H. (2009).** Changes in mineral and mineralizable N of soil incubated at varying salinity, moisture and temperature regimes. *Pakistan Journal of Botany*, **41** : 967-980.
- Ayala-Astorga G.I., Alcaraz-Meléndez L. (2010).** Salinity effects on protein content, lipid peroxidation, pigments, and proline in *Paulownia imperialis* (Siebold & Zuccarini) and *Paulownia fortunei* (Seemann & Hemsley) grown in vitro. *Electronic Journal of Biotechnology*, **13**: 5-15.
- Azcón R. et Al-Atrash F. (1997).** Influence of arbuscular mycorrhizae and phosphorus fertilisation on growth, nodulation and N₂ fixation [15N] in *Medicago sativa* and four salinity levels. *Biology and Fertility of Soils*, **24** : 81-86.
- Azcón R., Rubio R. et Barea J.M. (1991).** Selective interactions between different species of mycorrhizal fungi and Rhizobium meliloti strains and their effects on growth, N₂ fixation (15N) and nutrition of *Medicago sativa* (L.). *New Phytologist*, **117** : 399-404.
- Azcón R. et Tobar R. (1998).** Activity of nitrate reductase and glutamine synthetase in shoot and root of mycorrhizal *Allium cepa*. Effect of drought stress. *Plant Science*, **133** : 1-8.
- Azcón-Aguilar C. et Barea J.M. (1992).** Interactions between mycorrhizal fungi and other rhizosphere microorganisms, in: Allen M.F. (Ed.), Mycorrhizal Functioning. An Integrative Plant-Fungal Process, Chapman & Hall, New York, pp. 163–198.

- Bago B., Pfeffer P.E., Abubaker J., Jun J., Allen J.W., Brouillette J., Douds D.D., Lammers P.J. et Shachar-Hill Y. (2003).** Carbon Export from Arbuscular Mycorrhizal Roots Involves the Translocation of Carbohydrate as well as Lipid. *Plant Physiology*, 131: 1496-1507.
- Baker D.D. et Mullin B.C. (1992).** Actinorhizal symbioses. *Biological nitrogen fixation*: 259-291.
- Bakhoun N., Ndoye F., Kane A., Assigbetse K., Fall D., Sylla S.N. et al. (2012).** Impact of rhizobial inoculation on *Acacia senegal* (L.) Willd. growth in greenhouse and soil functioning in relation to seed provenance and soil origin. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 28 : 2567-2579.
- Ballesteros E., Blumwald M.C., Donaire J.P. et Belber A. (1997).** Na⁺/H⁺ antiport activity in tonoplast vesicles isolated from sunflower roots induced by NaCl stress. *Physiologia Plantarum*, 99 : 328-334.
- Baltierra F., Castillo M., Gamboa M.C., Rothhammer M. et Krauskopf E. (2013).** Molecular characterization of a novel Na⁺/H⁺ antiporter cDNA from *Eucalyptus globules*. *Biochemical and Biophysical Research Communications*. 430: 535-540.
- Banet G., Wininger S., Badani H., Ben-Dor B., Friedman Y. et Kapulnik Y. (1996).** Toxic and osmotic effects of salinity on growth and nodulation of *Medicago sativa*. *Symbiosis*, 21 : 209-222.
- Bano A. et Fatima M. (2009).** Salt tolerance in *Zea mays* (L.) following inoculation with Rhizobium and Pseudomonas. *Biology and Fertility of Soils*, 45 : 405-413.
- Bao S.D. (2005).** Analysis of soil agrochemistry (3rd edition). Beijing, China: China Agriculture Press. 495 p.
- Barea J.M., Azcón R. et Azcón-Aguilar C. (1992).** Vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi in nitrogen-fixing systems. *Methods in Microbiology*, 24 : 391-416.
- Barea J.M. et Azcón-Aguilar C. (1983).** Mycorrhizas and their significance in nodulating nitrogen fixing plants. *Advances in Agronomy*, 3 : 1-54.
- Barea J.M., Azcón R. et Azcón-Aguilar C. (1992).** Vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi innitrogen-fixing systems. In J. R. Norris, D. Read and A. Varma (Eds.), *Methods in Microbiology*. Vol 24. Techniques for the Study of Mycorrhizae (pp. 391-416). London, UK: Academic Press.
- Barrs H. (1968).** Determination of water deficit in plants tissues - In Kozlowski, I (ed): *Water deficit and plant growth* -235-368 Academy press, New York.
- Basavaraja P.K., Sharma S.D., Badrinath M.S., Sridhara S. et Hareesh G.R. Karnataka J. (2007).** *Prosopis juliflora* - An Efficient Tree Species for Reclamation of Salt Affected Soils. *Agricultural Science*, 20 (4) : 727-731

- Ben Khaled L., Morte Gomez A., Ouarraqi E.M. et Oihabi A. (2003).** Réponses physiologiques et biochimiques du trèfle (*Trifolium alexandrinum* L.) à la double association Mycorhizes-Rhizobium sous une contrainte saline. *Agronomie*, **23** : 571-580.
- Bethlenfalvay G.J., Brown M.S. et Stafford A.E. (1985).** Glycine-Rhizobium symbiosis. II. Antagonistic effects between mycorrhizal colonization and nodulation. *Plant Physiology*, **79** : 1054-1058.
- Blumwald E., Aharon G.S. et Apse M.P. (2000).** Sodium transport in plant cells. *Biochimica et Biophysica Acta*, **1465** : 140-151.
- Boivin P. et Job J.O. (1988).** Conductivimétrie électromagnétique et cartographie automatique des sols salés. Cahiers ORSTOM de Pédologie 24.
- Boscari A., Mandon K., Poggi M.C. et Le Rudulier D. (2004).** Functional expression of *Sinorhizobium meliloti* BetS, a high-affinity betaine transporter, in *Bradyrhizobium japonicum* USDA110. *Applied Environmental Microbiology*, **70**: 5916-5922.
- Boscari A., Mandon K., Dupont L., Poggi M.C. et Le Rudulier D. (2002).** BetS is a major glycine betaine/proline betaine transporter required for early osmotic adjustment in *Sinorhizobium meliloti*. *Journal of Bacteriology*, **184**, 2654-2663.
- Brun A. (1980).** Effets comparés de différentes concentrations de NaCl sur la germination, la croissance et la composition minérale de quelques populations de luzernes annuelles d'Algérie. Thèse, Doctorat 3 ème cycle, Université du Languedoc, 79 p.
- Burleigh S. et Torrey J.G. (1990).** Effectiveness of different Frankia cell types as inocula for the actinorhizal plant *Casuarina*. *Applied and environmental microbiology*, **56**: 2565–2567.
- Cano E.A., Perez-Alfocea F., Moreno V., Caro M. et Bolarin M.C. (1998).** Evaluation of salt tolerance in cultivated and wild tomato species through *in vitro* shoot apex culture. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, **53**: 19-26.
- Cantrell I.C. et Linderman R.G. (2001).** Preinoculation of lettuce and onion with VA mycorrhizal fungi reduces deleterious effects of soil salinity. *Plant and Soil*, **233**: 269-281.
- Chaia E., Wall L.G. et Huss-Danell K. (2010).** Life in soil by the actinorhizal root nodule endophyte Frankia. *Symbiosis*, **51**: 201–226.
- Cha-um S. et Kirdmanee C. (2011).** Remediation of salt-affected soil by the addition of organic matter-An investigation into improving glutinous rice productivity. *Scientia Agricola*, **68** : 406-410.
- Chandra S., Joshi H.C., Pathak H., Jain M.C. et Kalra N. (2002).** Effect of potassium salts and distillery effluent on carbon mineralization in soil. *Bioresource Technology*, **83** : 255-257.

- Cheeseman J.M. (2014).** The evolution of halophytes, glycophytes and crops, and its implications for food security under saline conditions. *New Phytologist*, **206**: 557-570.
- Chen W., Yan G.H. et Li J.L. (1988).** Numerical taxonomic study of fast-growing soybean rhizobia and a proposal that *Rhizobium fredii* be assigned to *Sinorhizobium* gen. Nov. *International Journal of Systematic and Bacteriology*, **38**: 797-804.
- Chen X., Bao H., Guo J., Jia W. et Li Y. (2015).** Overexpression of SeNHX1 improves both salt tolerance and disease resistance in tobacco. *Plant Signaling and Behavior*. **10** (4): e993240.
- Chen W.M., Moulin L., Bontemps C., Vandamme P., Bena G. et Boivin-Masson C. (2003).** Legume symbiotic nitrogen fixation by beta proteobacteria is widespread in nature. *Journal of Bacteriology*, **185** : 7266-7272.
- Chen X.Q. et Yu B.J. (2007).** Ionic effects of Na⁺ and Cl⁻ on photosynthesis in Glycine max seedlings under iso osmotic salt stress. *Journal of Plant Physiology and Molecular Biology*, **33** (4) : 294-300.
- Chinnusamy V., Jagendorf A. et Zhu J.K. (2005).** Understanding and improving salt tolerance in plants. *Crop Science*, **45**: 437 - 448.
- Choudhary O.P., Josan A.S., Bajwa M.S. et Kapur L. (2004).** Effect of sustained sodic and saline-sodic irrigation and application of gypsum and farmyard manure on yield and quality of sugarcane under semi-arid conditions. *Field Crops Research*, **87**: 103-116.
- Coba de la Peña T. et Pueyo J.J. (2011).** Legumes in the reclamation of marginal soils, from cultivar and inoculant selection to transgenic approaches. *Agronomy for Sustainable Development*, **32**: 65-91.
- da Silva E.N., Ribeiro R.V., Ferreira-Silva S.L., Viégas R.A. et Silveira J.A.G. (2011).** Salt stress induced damages on the photosynthesis of physicnut young plants. *Scientia Agricola*, **68** (1): 62-68.
- Daffé M. et Sadio S. (1988).** Étude de Régénération des sols salés du Bassin du Sine Saloum. Notice carte pédologique des sols et zonage (1 sur 15.000). Projet UNSO SEN 83 X 02 DRPF/ISRA Hann Dakar Sénégal.
- de Faria S.M., Lewis G.P., Sprent J. et Sutherland J.M. (1989).** Occurrence of nodulation in the *Leguminosae*. *New phytologist*, **111**: 607-619.
- de Lajudie P., Laurent-Fulele E., Willems A. Torck U. Coopman R., Collins M. D., Kersters K., Dreyfus B. et Gillis M. (1998).** *Allorhizobium undicola* gen. nov., sp. nov., nitrogen-fixing bacteria that efficiently nodulate *Neptunia natans* in Senegal. *International Journal of Systematic and Bacteriology*, **48** :1277-1290.
- De Mars B.D. et Broener R.E.J. (1995).** A simple method for observing VAM with suggestions for designing class activities. *Journal of Biology and Education*, **29** : 209-214.

- De Miranda J.C.C., Harris P.J. et Wild A. (1989).** Effects of soil and plant phosphorus concentrations on vesicular-arbuscular mycorrhizae in sorghum plants. *New Phytologist* 112:405-410. Gianinazzi-Pearson, S., Gianinazzi-Pearson, V. and Trouvelot, A. (editors) 1982. Mycorrhizae, an integral part of plants: biology and perspectives for their use. INRA-Presses, Paris, France.
- Debez A., Karim Ben H., Grignon C. et Abdelly C. (2004).** Salinity effects on germination, growth, and seed production of the halophyte *Cakile maritima*. *Plant and Soil*, **262**:179-189.
- Diacono M. et Montemurro F. (2010).** Long-term effects of organic amendments on soil fertility: A review. *Agronomy for Sustainable Development*, **30** : 401-422.
- Diagne N., Arumugam K., Ngom M., Nambiar-Veetil M., Franche C., Narayanan K.K., Laplaze L. (2013a).** Use of Frankia and actinorhizal plants for degraded lands reclamation. *BioMed research international*, pp 9.
- Diagne N., Diouf D., Svistoonoff S., Kane A., Noba K., Franche C., Bogusz D., Duponnois R. (2013b).** Casuarina in Africa: distribution, role and importance of arbuscular mycorrhizal, ectomycorrhizal fungi and Frankia on plant development. *Journal of Environmental Management*, **128**: 204–209.
- Diouf D., Duponnois R., Ba A.T., Neyra M. et Lesueur D. (2005).** Symbiosis of *Acacia auriculiformis* and *Acacia mangium* with mycorrhizal fungi and *Bradyrhizobium* spp. improves salt tolerance in greenhouse conditions. *Functional Plant of Biology*, **32**: 1143-1152.
- Diouf D., Fall D., Chaintreuil C., Ba A.T. , Dreyfus B., Neyra M., Ndoye I. et Moulin L. (2010).** Characterization of *Mesorhizobium* spp. strains associated with *Acacia seyal* Del. in Senegal by phenotypic, symbiotic, and molecular methods. *Journal of Applied Microbiology*, **108**: 818-830.
- Dixon R.O.D. et Wheeler C.T. (1986).** Nitrogen fixation in plants. (Blackie,Glasgow, United Kingdom).
- Dixon R.K., Rao M.V. et Garg V.K. (1993).** Inoculation of *Leucaena* and *Prosopis* seedlings with *Glomus* and *Rhizobium* species in saline soil: Rhizosphere relations and seedling growth. *Arid Soil, Research Rehabilitation*, **7** : 133-144.
- Dodd I.C. et Rui'z-Lozano JM. (2012).** Microbial enhancement of crop resource use efficiency. *Current Opinion in Biotechnology*, **23** : 236-242.
- Dommergues Y.R. (1995).** Nitrogen fixation by trees in relation to soil nitrogen economy. *Fertilizer Research*, **42** : 215-230.
- Dreyfus B.L., Alazard D. et Gillis M. (1988).** Characterisation of *Azorhizobium caulinodans* gen. nov. sp . nov., a stem-nodulating nitrogen-fixing bacterium isolated from *Sesbania rostrata*. *International Journal of Systematic and Bacteriology*, **38** : 89-98.

- Dreyfus B.L. et Dommergues Y.R. (1981).** Nodulation of *Acacia* species by fast and slow growing tropical strains of *Rhizobium*. *Applied and Environmental Microbiology*, **41**: 97-99.
- Dubey R.S. (1994).** Protein synthesis by plants under stressful conditions. Pages 277-299 in Handbook of plant and crop stress (Pessarakli M, ed.). New York, USA: Marcel Dekker, Inc.
- Duhoux E., Diouf D., Gherbi H., Franche C, Ahée J. et Bogusz D. (1996).** Le nodule actinorhizien. *Acta botanica gallica*, **143**: 593-608.
- Egamberdieva D. et Kucharova Z. (2009).** Selection for root colonizing bacteria stimulating wheat growth in saline soils. *Biology and Fertility of Soils*, **45** : 563-571.
- El Keblawy A. et Al-Rawai A. (2005).** Effect of salinity, temperature and light on germination of invasive *Prosopis juliflora* (Sw.) D.C. *Journal of Arid Environment*, **61**: 555-565.
- El-Tayeb M.A. (2005).** Response of barley grains to the interactive effect of salinity and salicylic acid. *Plant Growth Regulation*, **45**: 215-224.
- Fagg C.W. et Stewart J.L. (1994).** The value of *Acacia* and *Prosopis* in arid and semi-arid environments. *Journal of Arid Environment*, **27**: 3-25.
- Fall D., Diouf D., Neyra M., Diouf O. et Diallo N. (2009).** Physiological and biochemical responses of *Acacia seyal* (Del.) seedlings under salt stress. *Journal of Plant Nutrition*, **32**: 1122-1136.
- FAO-LADA (2009).** Field Manual for Local Level Land Degradation Assessment in Drylands. LADA-L Part 1: Methodological Approach, Planning and Analysis, Rome: FAO. 76 pp.
- FAO-IPTRID (2006).** Electronic conference on salinization : extension of salinization and strategies of prevention and rehabilitation. Project CISEAU.
- Feng G., Zhang F.S., Li X.L., Tian C.Y., Tang C. et Rengel Z. (2002).** Improved tolerance of maize plants to salt stress by arbuscular mycorrhiza is related to higher accumulation of soluble sugars in roots. *Mycorrhiza*, **12**: 185-190.
- Flower T.J. (2004).** Improving crop salt tolerance. *Journal of Experimental Botany*, **55**: 307-319.
- Fortin J.A., Plenchette C. et Piché Y. (2008).** Les mycorhizes, la nouvelle révolution verte. (Eds. Multimondes et Quae), pp. 131.
- Frank B. (1889).** Uber die pilzsymbiose der leguminosen. *Ber Dtsch Bot Ges*, **7**: 332-346.
- Galiana A., Chaumont J., Diem H.G. et Dommergues Y.R. (1990).** Nitrogen fixation potential of *Acacia mangium* and *Acacia auriculiformis* seedlings inoculated with *Bradyrhizoiium* and *Rhizobium* spp. *Biology and Fertility Soils*, **9**: 261-267.

- Garcia C. et Hernandez T. (1996).** Influence of salinity on the biological and biochemical activity of a calciothid soil. *Plant and Soil*, **178**, 255-263.
- Gentili F. et Huss-Danell K. (2002).** Phosphorus modifies the effects of nitrogen on nodulation in split-root systems of *Hippophaë rhamnoides*. *New Phytologist*, **153**: 53-61.
- Gentili F. et Huss-Danell K. (2003).** Local and systemic effects of phosphorus and nitrogen on nodulation and nodule function in *Alnus incana*. *Journal of Experimental Botany*, **54**: 2757–2767
- Gerdemann J.W. et Nicolson T.H. (1963).** Spores of mycorrhizal endogone species extracted from soil by wet sieving and decanting. *Transactions of the British Mycology Society*, **46** : 235-244.
- Ghassemi F., Jakeman A.J. et Nix H.A. (1995).** Salinisation of land and water resources: human causes, extent, management and case studies. Center for resource and environmental studies, The Australian National University, Canberra, Australia. 125 p
- Ghoulam C., Foursy A., Fares K. (2002).** Effects of salt stress on growth, inorganic ions and proline accumulation in relation to osmotic adjustment in five sugar beet cultivars. *Environmental and Experimental Botany*, **47**: 39-50.
- Giffard P.L. (1972).** Étude des possibilités d'afforestation des sols salés du Sine Saloum. Rapport préliminaire C.T.F.T. Nogent Marne France 2 – 59 p.
- Giri B., Kapoor R. et Mukerji K.G. (2002).** VA Mycorrhizal techniques/VAM technology in establishment of plants under salinity stress conditions. In: Techniques in mycorrhizal studies. (Eds.): K.G. Mukerji, C. Manoharachary & B.P. Chamola. Netherlands: Kulwer, 313-327.
- Gorham J., Wyn Jones R. G. et Mc Donnell E. (1985).** Some mechanisms of salt tolerance in crop plants. *Plant and Soil*, **89**: 15-40.
- Gouiaa S., Khoudi H., Leidi E.O., Pardo J.M. et Masmoudi K. (2012).** Expression of wheat Na⁺/H⁺ antiporter TNHXS1 and H⁺-pyrophosphatase TVP1 genes in tobacco from a bicistronic transcriptional unit improves salt tolerance. *Plant Molecular and Biology*, **79**:137-155.
- Graham P.H. (1992).** Stress tolerance in *Rhizobium* and *Bradyrhizobium*, and nodulation under adverse soil conditions. *Canadian Journal of Microbiology*, **38**: 475-484.
- Grant C.A., Flaten D.N., Tomasiewicz D.J. et Sheppard S.C. (2001).** The importance of early season phosphorus nutrition. *Canadian Journal of Plant Science*, **81**: 211-224.
- Greenway H. et Munns R (1980).** Mechanisms of salt tolerance in non-halophytes. Annual Review

- Hajiboland R., Aliasgharzadeh N., Laiegh S.F. et Poschenrieder C. (2010).** Colonization with arbuscular mycorrhizal fungi improves salinity tolerance of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) plants. *Plant and Soil*, **331** : 313–327.
- Hanay A., Büyüksönmez F., Kiziloglu F.M. et Canbolat M.Y. (2004).** Reclamation of saline-sodic soils with gypsum and MSW compost. *Compost Science and Utilization*, **12**: 175-179.
- Hardikar S.A. et Pandey A.N. (2008).** Growth, water status and nutrient accumulation of seedlings of *Acacia senegal* (L.) Willd.in response to soil salinity. *Anal of Biology*, **30**: 17-28.
- Hasegawa P.M., Bressan A.B., Zhu J.K., Bohnert H.J. (2000).** Plant cellular and molecular responses to high salinity. *Annual Review Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, **51**: 463-499.
- Hatimi A., Achouri M. et Oihabi A. (1997).** Endomycorhization de légumineuses fixatrices de dunes : croissance et nutrition phosphatée. *Sécheresse*, **8** : 99-102.
- Heidari M. (2012).** Effects of salinity stress on growth, chlorophyll content and osmotic components of two basil (*Ocimum basilicum* L.) genotypes. *African Journal of Biotechnology*, **11**: 379-384.
- Hellsten A. et Huss-Danell K. (2001).** Interaction effects of nitrogen and phosphorus on nodulation in red clover (*Trifolium pratense* L.). *Acta Agriculturae Scandinavica. Section B, Soil and Plant Science*, **50**: 135-142.
- Hillel D. (2005).** Salinity, p. 435-442. In Hillel D., Rosenzweig C., Powlson D., Scow K., Singer M., Sparks D.,(ed.), *Encyclopedia of soil in the environment*.Vol 03. Columbia University, USA.
- Hossain M.B. et Sarker R.R. (2015).** Organic and Inorganic Amendments on Rice (*Oryza sativa* L.) and Soil in Salt Affected Areas of Bangladesh. *Journal of Environmental Science and Natural Resources*, **8**: 109-113.
- Hosseini G. et Thengane R.J. (2007).** Salinity tolerance in cotton (*Gossypium hirsutum* L.) genotypes. *International Journal of Botany*, **3**: 48-55.
- Hu L.H. et Wu Y.X. (2014).** Effect of salt stress on the expression of NHX- type Na⁺/H⁺ antiporters in *Populus euphratica* and *P. pruinosa calli*. *Sci. Cold Arid Reg.* **6** (1): 66-72.
- Hu Y. et Schmidhalter U. (2005).** Drought and salinity: A comparison of their effects on mineral nutrition of plants. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, **168**, 541-549.
- Huss-Danell K. 1997.** Actinorhizal symbioses and their N₂ fixation. Tansley Review No. 93. *New Phytologist*, **136**: 375-405.

- Hussain N., Hassan G., Arshadullah M. et Mujeeb F. (2001).** Evaluation of amendments for the improvement of physical properties of sodic soil. *International Journal of Agricultural Biology*, **3** : 319 -322.
- Ichaou A. et Ali M. (2006).** Élaboration d'une stratégie de contrôle des espèces envahissantes, Niamey/Niger, MHE/LCD/Projet de Cogestion des Ressources Naturelles de L'Air et du Ténéré (COGERAT), 63 p.
- Ickowicz A., Friot D. et Guérin H. (2005).** *Acacia senegal*, arbre fourrager sahélien ? *Bois et Forêts des Tropiques*, **284** (2) : 59-69.
- Jaarsma R., de Vries R.S.M. et de Boer A.H. (2013).** Effect of salt stress on growth, Na⁺ accumulation and proline metabolism in potato (*Solanum tuberosum*) cultivars. *PLoS ONE*, **8** (3): e60183.
- Jarvis B.D.W., Van Berkum P., Chen W.X., Nour S.M., Fernandez M.P., Cleyet-marel J.C. et Gillis M. (1997).** Transfer of *Rhizobium loti*, *Rhizobium huakui*, *Rhizobium ciceri*, *Rhizobium mediterraneum* and *Rhizobium tianshanense* to *Mesorhizobium* genus novae. *International Journal of Systematic and Bacteriology*, **47** : 895-898.
- Joner Erik J. et Johansen A. (2000).** Phosphatase activity of external hyphae of two arbuscular mycorrhizal fungi. *Mycology Research*, **104** : 81-86.
- Jordan D.C. (1982).** Transfer of *Rhizobium japonicum* Buchanan 1980 to *Bradyrhizobium* gen. nov., a genus of slow-growing, root nodulating bacteria from leguminous plants. *International Journal of Bacteriology*, **32** : 136-139.
- Juniper S. et Abbott L. (1993).** VAM and soil salinity. *Mycorrhiza*, **4** : 45-57.
- Kahlown M.A. et Azam M. (2003).** Effect of saline drainage effluent on soil health and crop yield. *Agricultural and Water Management*, **62** : 127-138.
- Khajeh-Hosseini M., Powell A.A. et Bingham I.J. (2003).** The interaction between salinity stress and seed vigour during germination of soybean seeds. *Seed Science and Technology*, **31**: 715-725.
- Khaled H. et Fawy H.A. (2011).** Effect of different levels of humic acids on the nutrient content, plant growth, and soil properties under conditions of salinity. *Soil and Water Research*, **6** : 21-29.
- Khan A.H. et Marshall C. (1981).** Salt tolerance within populations of chewing fescue (*Festuca rubra* L.). *Commun Soil Sci Plant Anal*, **12**: 1271-1281.
- Kigel J. (1995).** Seed germination in arid and semi-arid regions. In: Kigel J, Galili G. (edss), *Seed Development and Germination*, 645-699. Marcel Dekker Inc. New York.
- Klute A., Weaver R.W., Mickelson S.H., Sparks D.L., Bartels J.M., Dane J.H. et Topp G. (1994).** *Methods of soil analysis: part 3 - chemical methods*. Madison, Wisconsin, Soil Science Society of America Book Series.

- Kohl K.I. (1997).** NaCl homeostasis as a factor for the survival of the evergreen halophyte *Armeria maritima* (Mill.) Willd. under salt stress in winter. *Plant Cell and Environment*, **20**: 1253-1263.
- Koide R.T. et Li, M. (1990).** On host regulation of the vesicular-arbuscular mycorrhizal symbiosis. *New Phytologist*, **114**: 59-65.
- Koide R.T. (1991).** Nutrient supply, nutrient demand and plant response to mycorrhizal infection. *New Phytologist*, **117**: 365-386
- Kyalangalilwa B., Boatwright J.S., Daru B.H., Maurin O., Van Der Bank M. (2013).** Phylogenetic position and revised classification of *Acacia* s.l. (*Fabaceae* : *Mimosoideae*) in Africa, including new combinations in *Vachellia* and *Senegalia*. 500-523.
- Lakhdara A., Hafsi C., Rabhi M., Debez A., Montemurro F., Abdelly C., Jedidi N., Ouerghi Z. (2008).** Application of municipal solid waste compost reduces the negative effects of saline water in (*Hordeum maritimum* L.). *Bioresource and Technology*, **99**: 7160-7167.
- Lakhdara A., Scelza R., Scotti R., Rao M.A, Jedidi N., Gianfreda L. et Abdelly C. (2010).** The effect of compost and sewage sludge on soil biologic activities in salt affected soil. *Revista de la ciencia del suelo y nutrición vegetal*, **10**: 40-47.
- Lauchli A. et Epstein E. (1990).** Plant response to salinity and sodic conditions. In *Agricultural Salinity Assessment and Management; Manual and Reports on Engineering Practice 71*; Tanji, K.K., Ed.; American Society of Civil Engineers: New York, NY, USA, pp. 113-137.
- Lavelle P. et Spain A.V. (2001).** Soil ecology. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht, The Netherlands. 654 p
- Lax A., Diaz E., Castillo V. et Albaladejo J. (1994).** Reclamation of physical and chemical properties of a salinized soil by organic amendment. *Arid Soil Research and Rehabilitation*, **8** : 9-17.
- Lazof D.B. et Bernstein N. (1998).** The NaCl-induced inhibition of shoot growth: The case for disturbed nutrition with special consideration of calcium nutrition. *Advances in Botany Research*, **29**: 113-189.
- Lechevalier M.P. (1994).** Taxonomy of the genus *Frankia* (Actinomycetales). *International Journal of Systematic Bacteriology*, **44**: 1-8.
- Le Houerou H.N. (1980).** The rangelands of the Sahel. *Journal Range Management*, **33**: 41-46.
- Levigneron A., Lopez F., Vansuyt G., Berthomieu P., Fourcroy P. et Casse-Delbart F. (1995).** Les plantes face au stress salin. *Cahier d'Agriculture*, **4**: 263-273.

- Liang Y., Nikolic M., Peng Y., Chen W. et Jiang Y. (2005).** Organic manure stimulates biological activity and barley growth in soil subject to secondary salinization. *Soil Biology and Biochemistry*, **37** : 1185-1195.
- Liang Y., Yang Y., Yang C., Shen Q., Zhou J. et Yang L. (2003).** Soil enzymatic activity and growth of rice and barley as influenced by organic manure in an anthropogenic soil. *Geoderma*, **115** : 149-160.
- Lin D.X., Wang E.T., Tang H., Han T.X., He Y.R., Guan S. H. et Chen W.X. (2008).** *Shinella kummerowiae* sp. nov., a symbiotic bacterium isolated from root nodules of the herbal legume *Kummerowia stipulacea*. *International Journal of Systematic and Microbiology*, **58**: 1409-1413.
- Loureiro M.F., de Faria S.M., James E.K. et Franco A. (1994).** Nitrogen-fixing stem nodules of legumes, *Discolobium pullulement*, Benth. *New phytology*, **128**: 283-295.
- Loyer J.Y et Le Brusq J.Y. (1982).** Relation entre les mesures de conductivité sur des extraits de sol de rapports sol/solution variables dans la vallée du fleuve Sénégal. *Cahiers ORSTOM, série Pédologie. Vol. XIX, n°3. 9* (3): 293-301.
- Loyer J.Y. (1991).** Classification des sols salés : les sols salic. *Cahiers Orstom série Pédologie*, **26**: 51-61.
- M'Baré C.O. (2001).** Situation des ressources génétiques forestières de la Mauritanie, Atelier sous-régional FAO/IPGRI/CIRAF sur la conservation, la gestion, l'utilisation durable et la mise en valeur des ressources génétiques forestières de la zone sahélienne. Ouagadougou (22-24 sept. 1998) : Service de la mise en valeur des ressources forestières, Division des ressources forestières. FAO, Rome, 37.
- Madejon E., Burgos P., Lopez R. et Cabrera F. (2001).** Soil enzymatic response to addition of heavy metals with organic residues. *Biology and Fertility of Soils*, **34** : 144-150.
- Mahdy A.M. (2011).** Comparative effects of different soil amendments on amelioration of saline-sodic soils. *Soil Water Research*, **6** : 205-216.
- Mahmood I.A., Ali A., Aslam M., Shahzad A., Sultan T. et Hussain F. (2013).** Phosphorus availability in different salt-affected soils as influenced by crop residue incorporation. *International Journal of Agriculture and Biology*, **15**: 472-478.
- Maliwal G.L. (1999).** Reclamation of saline and sodic soils through *Prosopis juliflora*. *Indian Journal of Forestry*, **22**: 132-135.
- Mallet B., Besse F., Gautier D., Muller D., Bouba N. et Njiti C. (2002).** Quelles perspectives pour les gommiers en zone de savanes d'Afrique centrale ? In : J.Y. Jamin, L. Seiny Boukar (Ed.) Actes du colloque Savanes africaines : des espaces en mutation, des acteurs face à de nouveaux défis, Maroua, Cameroun, mai 2002, N'Djamena : Prasac, 12 p.

- Manga A., Diop T.A., Van Tuinen D. et Neyra M. (2007).** Molecular diversity of arbuscular mycorrhizal fungi associated with *Acacia seyal* in a semiarid zone of Senegal. *Sécheresse*, **18**: 129-133.
- Mansour M.M.F. et Salama K.H.A. (2000).** Cellular basis of salinity tolerance in plants. *Environmental and Experimental of Botany*, **52**: 113-122.
- Marlet S. (2005).** Gestion de l'eau et salinisation des sols dans les systèmes irrigués Synthèse de l'atelier du PCSI sur : Vers une maîtrise des impacts environnementaux de l'irrigation. CIRAD/AMIS, Montpellier, France, n°40, pp. 12-23.
- Marschner P., Kandeler E. et Marschner B. (2003).** Structure and function of the soil microbial community in a long-term fertilizer experiment. *Soil Biology and Biochemistry*, **35** : 453-461.
- Marulanda A., Azcon R. et Ruiz-Lozano J.M. (2003).** Contribution of six arbuscular mycorrhizal fungal isolates to water uptake by *Lactuca sativa* plants under drought stress. *Physiologia Plantarum*, **119**: 1-8.
- Maynaud G., Willems A., Soussou S., Vidal C., Maure L., Moulin L., Cleyet-Marel J.C. et Brunel B. (2012).** Molecular and phenotypic characterization of strains nodulating *Anthyllis vulneraria* in mine tailings, and proposal of *Aminobacter anthyllidis* sp. nov., the first definition of *Aminobacter* as legume-nodulating bacteria. *Systematic of Applied Microbiology*, **35**: 65-72.
- Mc Millen B.G., Juniper S. et Abbott L.K. (1998).** Inhibition of hyphal growth of a vesicular-arbuscular mycorrhizal fungus in soil containing sodium chloride limits the spread of infection from spores. *Soil Biology and Biochemistry*, **30** : 1639-1646.
- McKenzie N.J., Jacquier D.J., Isbell R.F. et Brown K.L. (2004).** Australian Soils and Landscapes: An Illustrated Compendium. CSIRO Publishing: Collingwood, Victoria.
- Mengel K. et Kirkby E.A. (1987).** Principles of Plant Nutrition, 4th edition. International Potash Institute, Bern, Switzerland
- Mills H.A. et Jones J.B. (1996).** Plant Analysis Handbook II. MicroMacro Publishing, Athens, Georgia, USA
- Misra A., Sahu A.N., Misra M., Singh P., Meera I., Das N., Kar M. et Sahu P. (1997).** Sodium chloride induced changes in leaf growth, and pigment and protein contents in two rice cultivars. *Biologica Plantarum*, **39**: 257-262.
- Mitchell J.P., Shennan C., Singer M.J., Peters D.W., Miller R.O., Prichard T., Grattan S.R., Rhoades J.D., May D.M. et Munk D.S. (2000).** Impacts of gypsum and winter cover crops on soil physical properties and crop productivity when irrigated with saline water. *Agricultural Water Management*, **45**: 55-71.

- Mizukami M.Y. et Yamamoto Y. (1991).** Analysis of indole acetic acid and abscisic acid contents in nodules of soybean plants bearing VA mycorrhizal. *Soil Science and Plant Nutrition*, **37**: 291-298.
- Moiroud A. (1996).** Diversité et écologie des plantes actinorhiziennes. *Acta Botanica Gallica*, **143**: 651-661.
- Mojiri A. (2011).** Effects of municipal wastewater on physical and chemical properties of saline soil. *Journal of Biology and Environmental Science*, **5** : 71-76.
- Molazem D., Qurbanov E.M. et Dunyamaliyev SA (2010).** Role of proline, Na and chlorophyll content in salt tolerance of corn (*Zea mays* L.). *American-Eurasian Journal of Agricultural and Environmental Science*, **9** : 319-324.
- Mori S., Suzuki K., Oda R., Higuchi K., Maeda Y., Yoshiba M. et Tadano T. (2011).** Characteristics of Na⁺ and K⁺ absorption in *Suaeda salsa* (L.) Pall. *Soil Science and Plant Nutrition*, **57** (3) : 377-386
- Moulin L., Munive A., Dreyfus B. et Boivin-Masson C. (2001).** Nodulation of legumes by members of the beta-subclass of *proteobacteria*. *Nature*, **411**: 948-950.
- Muhammad S., Müller T. et Joergensen R.G. (2005).** Relationships between soil biological and other soil properties in saline and alkaline arable soils from the Pakistani Punjab. In. Muhammad, S. "Microbial use of organic substrates and maize growth, especially in saline and alkaline soils of the Pakistani Punjab". PhD thesis, Department of Soil Biology and Plant Nutrition, Faculty of Organic Agricultural Sciences, University of Kassel. pp 48-71.
- Mullis K.B. et Faloona A. (1987).** Specific synthesis of DNA *in vitro* via a polymerase-catalyzed chain reaction. *Methods Enzymol.*, **155**: 335-350.
- Munns R. (1993).** Physiological processes limiting plant growth in saline soil: some dogmas and hypotheses. *Plant Cell Environment*, **16**: 15-24.
- Munns R. (2009).** Strategies for Crop improvement in Saline Soils. Chapter 11. In M. Ashraf, M. Ozturk, H.R. Athar (ed.), *Salinity and water stress, improving crop efficiency*, Springer Science. Business Media B.V
- Munns R., Richard A.J. et Lauchli A. (2006).** Approaches to increasing the salt tolerance of wheat and other cereals. *Journal of Experimental Botany*, **57** (5): 1025-1043.
- Nannipieri P., Ascher J., Ceccherini M.T., Landi L., Pietramellara G. et Renella G. (2003).** Microbial diversity and soil functions. *European Journal of Soil Science*, **54**: 655-670.

- Navarro J.M., Garrido C., Martínez V., Carvajal M. (2003).** Water relations and xylem transport of nutrients in pepper plants grown under two different salts stress regimes. *Plant Growth and Regulation*, **41**: 237-245.
- Ndiaye J.P. (1999).** Utilisation du phosphogypse dans les sols de la vallée alluviale du fleuve Sénégal. Dot. ISRA 9 p.
- Ndoye F., Kane A., Bakhoun N., Sanon A., Fall D., Diouf D., Sylla S.N., Ba A., Sy M.O. et Noba N. (2013).** Response of *Acacia senegal* (L.) Willd. to inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi isolates in sterilized and unsterilized soils in Senegal. *Agroforestry System*, **87**: 941-952.
- Ndoye I., Gueye M., Danso S.K.A. et Dreyfus B. (1995).** Nitrogen fixation in *Faidherbia albida*, *Acacia raddiana*, *Acacia senegal* and *Acacia seyal* estimated using the ¹⁵N isotope dilution technique. *Plant and Soil*, **172**: 175-180.
- Neffati M. (1994).** Caractérisation morpho-biologique de quelques espèces végétales Nord Africaines: Implication pour l'amélioration pastorale. Ph, D, sci, biolo, Univ, Gent. Belgique. 264p.
- Ng B.H. (1987).** The effects of salinity on growth, nodulation and nitrogen fixation of *Casuarina equisetifolia*. *Plant and Soil*, **103**: 123-125.
- Ngom M., Oshone R., Diagne N., Cissoko M., Svistoonoff S., Tisa L.S., Laplaze L., Sy M.O. et Champion A. (2016).** Tolerance to environmental stress by the nitrogen-fixing actinobacterium *Frankia* and its role in actinorhizal plants adaptation. *Symbiosis*, **70**: 17-29.
- Niu X., Bressan R.A., Hasegawa P.M. et Pardo J.M. (1995).** Ion homeostasis in NaCl stress environments. *Plant Physiology*, **109**: 735-742.
- Okuma E., Soeda K., Tada M. et Murata Y. (2000).** Exogenous proline mitigates the inhibition of growth of *Nicotiana tabacum* cultured cells under saline conditions. *Soil Science and Plant Nutrition*, **46** : 257-263.
- Oliveira R.S., Castro P.M.L., Dodd J.C., Vosátka M. (2005).** Synergistic effect of *Glomus intraradices* and *Frankia* spp. on the growth and stress recovery of *Alnus glutinosa* in an alkaline anthropogenic sediment. *Chemosphere*, **60**: 1462-1470.
- Oo A.N., Iwai C.B. et Saenjan P. (2013).** Soil properties and maize growth in saline and nonsaline soils using cassava-industrial waste compost and vermicompost with or without earthworms. *Land Degradation Development*, **26** : 300-310.
- Ouerghi Z., Zid E., Hajji M. et Soltani A (1998).** Comportement physiologique du blé dur (*Triticum durum* L.) en milieu salé. CIHEAM - *Options Méditerranéennes* : 309-31.

- Panahi B., Ahmadi F.S., Mehrjerdi M.Z. et Moshtaghi N. (2013).** Molecular cloning and the expression of the Na⁺/H⁺ antiporter in the monocot halophyte *Leptochloa fusca* (L.) Kunth. *NJAS – Wag. Journal Life and Science*, **64-65**: 87-93.
- Pattanayak S.K., Mishra K.N., Jena K.N. et R.K. Nayak. (2001).** Evaluation of green manure crops fertilized with various phosphorus sources and their effect on subsequent rice crop. *Journal of the Indian Society of Soil Science*, **49** (2): 285-291.
- Peoples M.B., Herridge D.F. et Ladha J.K. (1995).** Biological nitrogen fixation: an efficient source of nitrogen for sustainable agricultural production. *Plant and Soil*, **174**: 3-28.
- Peoples M.B., Herridge D.F. et Ladha J.K. (1995).** Biological nitrogen fixation: an efficient source of nitrogen for sustainable agricultural production. *Plant and Soil*, **174**: 3-28.
- Phillips J.M. et Hayman D.S. (1970).** Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection. *Trans. British Mycology Society*. **55**: 158-161.
- Pitmani M.G. et Lauchli A. (2004).** Global impact of salinity and agricultural ecosystems, p. 3-20. In A. Läuchli, et U. Lüttig (ed.), *Salinity : Environment-plants-molecules*. Kluwer, Dordrecht, Netherlands.
- Pocknee S. et Sumner M.E. (1997).** Cation and nitrogen contents of organic matter determine its soil liming potential. *Soil Science Society of America Journal*, **61**: 86-92.
- PROGERT (2006, 2007 et 2008).** Rapports annuels sur le Projet Récupération des Terres Salées, Direction des Eaux et Forêts, Chasse et de la Conservation des Sols, 20p.
- Qadir M. et Oster J.D. (2002).** Vegetative bioremediation of calcareous sodic soils: history, mechanisms, and evaluation. *Irrigation Science*, **21**: 91-101.
- Qadir M. et Schubert S. (2002).** Degradation processes and nutrient constraints in sodic soils. *Land Degradation and Development*, **13**: 275-294.
- Qadir M., Oster J.D., Schubert S., Noble A.D. et Sahrawat K.L. (2007).** Phytoremediation of sodic and saline-sodic soils. *Advances in Agronomy*, **96**: 197-247.
- Qadir M. et Oster J.D. (2004).** Crop and irrigation management strategies for saline-sodic soils and waters aimed at environmentally sustainable agriculture. *Science Total Environment*, **323** : 1-19.
- Rao D.L.N. et Pathak H. (1996).** Ameliorative influence of organic matter on biological activity of salt-affected soils. *Arid Soil and Research Rehabilitation*, **10** : 311-319.
- Reddell P., Foster R.C., Bowen G.D. (1986).** The effects of sodium chloride on growth and nitrogen fixation in *Casuarina obesa* Miq. *New phytologist*, **102**: 397-408.

- Requena N., Perez-Solis E., Azcon-Aguilar C., Jeffries P. et Barea J.M. (2001).** Management of indigenous plant-microbe symbioses aids restoration of desertified ecosystems. *Applied of Environmental Microbiology*, **67** (2): 495-498.
- Requena N., Jimenez I., Toro M. et Barea J.M. (1997).** Interactions between Plant-Growth-Promoting Rhizobacteria (PGPR), arbuscular mycorrhizal fungi and *Rhizobium* sp. In the rhizosphere of *Anthyllis cytisoides*, a model legume for revegetation in Mediterranean semi-arid ecosystems. *New Phytologist*, **136** : 667-677.
- Rhodes D. et Hanson A.D. (1993).** Quaternary ammonium and tertiary sulfonium compounds in higher plants. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, **44**: 357-384.
- Rietz D.N. et Haynes R.J. (2003).** Effects of irrigation induced salinity and sodicity on soil microbial activity. *Soil Biology and Biochemistry*, **35** (6) : 845-854.
- Rivas R., Velázquez E., Willems A. Vizcaíno N., Subba-Rao N.S., Mateos P.F., Gillis M., Dazzo F.B. et Martinez-Molina E. (2002).** A new species of *Devosia* that forms a unique nitrogen-fixing root-nodule symbiosis with the aquatic legume *Neptunia natans* (L.f) Druce. *Applied and Environmental Microbiology*, **68**: 5217-5222.
- Rodríguez L., Valdés R., Verdecia J., Arias L., Medina R. et Velasco E. (2001).** Growth, relative water content, transpiration and photosynthetic pigment content in coffee trees (*Coffea arabica* l.) growing at different sunlight regimes. *Cultivos tropicales*, **22** (4) : 37-41
- Rodriguez-Navarro A. et Rubio F. (2006).** High-affinity potassium and sodium transport systems in plants. *Journal of Experimental Botany*, **57** (5) : 1149-1160.
- Rosendahl C.N. et Rosendahl S. (1991).** Influence of vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi (*Glomus* sp.) on the response of cucumber (*Cucumis sativus* L.) to salt stress. *Environmental and Experimental Botany*, **31** : 313-318.
- Rout N.P. et Shaw B.P. (2001).** Salt tolerance in aquatic macrophytes: Ionic relation and interaction. *Biology of Plant*, **55**: 91-95.
- Rui-Fen Z., Fen-Lan T., Jie-Lin L., Feng-Qi L., Xiao-Yu D. et Ji-Shan C. (2016).** co-inoculation of arbuscular mycorrhizae and nitrogen fixing bacteria enhance alfalfa yield under saline conditions.
- Ruiz-Lozano J.M., Azcón R. et Gomez M. (1996).** Alleviation of salt stress by arbuscular *Glomus* species in *Lactuca sativa* plants. *Physiology of Plant*, **98** : 767-772.
- Ruiz-Lozano J.M. et Azcón R. (2000).** Symbiotic efficiency and infectivity of an autochthonous arbuscular mycorrhizal *Glomus* sp. from saline soils and *Glomus deserticola* under salinity. *Mycorrhiza*, **10** : 1-7.
- Sadio S. (1991).** Pédogenèse et potentialités forestières des sols sulfatés acides salés des tannes du Sine Saloum, Sénégal. ORSTOM, Bondy, France, pp. 269.

- Saghir A., Khan N.O., Igbal M.Z., Hussain A. et Hassan M. (2002).** Salt tolerance of cotton (*Gossypium hirsutum* L.). *Asian Journal of Plant Science*, **1**: 715-719.
- Sainio P.P., Kontturi M. et Peltonen J. (2006).** Phosphorus seed coating enhancement on early growth and yield components in oat. *Agronomy Journal*, **98**: 206-211.
- Sanchez-Diaz M., Aguirreolea J., Goicochea M.C. et Antolin M.C. (1995).** Limitations de la fixation symbiotique d'azote et autres aspects physiologique des légumineuses des zones méditerranéennes, Les colloques – INRA Editions, **77** : 11–29.
- Sané D., OuldKneyta M., Diaga D., Diouf D., Badiane F.A., Sagna M. et Borgel A. (2005).** Growth and development of date palm (*Phoenix dactylifera* L.) seedlings under drought and salinity stresses. *African Journal of Biotechnology*, **4**: 968-972.
- Santos C.V. (2004).** Regulation of chlorophyll biosynthesis and degradation by salt stress in sunflower leaves. *Scient. Horticult.* **103**: 93-99.
- Sardinha M., Muller T., Schmeisky H. et Joergensen R.G. (2003).** Microbial performance in soils along a salinity gradient under acidic conditions. *Applied Soil Ecology*, **23** (3) : 237-244.
- Schmidhalter H.Y.U. (2005).** Drought and salinity: A comparison of their effects on mineral nutrition of plants. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, **168** : 541-549.
- Schnürer J. et Rosswall T. (1982).** Fluorescein diacetate hydrolysis as a measure of total microbial activity in soil and litter. *Applied and Environmental Microbiology*, **6**: 1256-1261.
- Schuybert A. et Hayman D.S. (1986).** Plant growth responses to vesicular-arbuscular mycorrhizae. XVI. Effectiveness of different endophytes at different levels of soil phosphate. *New Phytologist*, **103**: 79-80
- Shaaban M., Abid M. et Abou-Shana R.A.I. (2013).** Amelioration of salt affected soils in rice paddy system by application of organic and inorganic amendments. *Plant Soil and Environment*, **59** (5): 227-233.
- Shachar-Hill Y., Rolin D.B., Pfeffer P.E. et Douuds D.D. (1997).** Uptake transfer of nitrogen to the host by arbuscular mycorrhizal fungus. *Plant Physiology* (Suppl.) 114 Abstract No. 106.
- Sharma S. et Vimala Y. (2016).** Effect of salt stress on germination and growth of *T. foenumgraecum* seedlings. *International Journal in Advanced Research*, **4** : 40 - 45.
- Sharma B.R. et Minhas P.S. (2005).** Strategies for managing saline/alkali waters for sustainable agricultural production in South Asia. *Agricultural Water Management*, **78**: 136-151.

- Sheng M., Tang M., Zhang F.F. et Huang Y.H. (2011).** Influence of arbuscular mycorrhiza on organic solutes in maize leaves under salt stress. *Mycorrhiza*, **21**: 423-430.
- Shereen A., Ansari R.U., Yasmin S., Raza S., Mumtaz S., Khan M.A., Mujtaba S.M. (2007).** Physiological responses of rice (*Oryza sativa* L.) to saline stress. *Pakistan Journal of Botany*, **39**: 2527-2534.
- Silini A., Cherif-Silini H. et Yahiaoui B. (2016).** Growing varieties durum wheat (*Triticum durum*) in response to the effect of osmolytes and inoculation by *Azotobacter chroococcum* under salt stress. *African Journal of Microbiology Research*, **10** (12) : 387-399.
- Silvia N., Vendrame S.W.A., Crane J.H., Pereira M.C., Costa A., Reis S.T. (2015).** Variability in reproductive traits in *Jatropha curcas* L. accessions during early developmental stages under warm subtropical conditions. *Glob Chang Biol Bioenergy*, **7**: 122-134
- Singh G. (2009).** Salinity-related desertification and management strategies: Indian experience. *Land Degradation and Development*, **20**: 367-385.
- Slaton N.A., Wilson C.E., Norman R.J., Ntamatungiro S. et Frizzell D.L. (2002).** Rice response to phosphorus fertilizer application rate and timing on alkaline soils in Arkansas. *Agronomy journal*, **94**: 1393-1399
- Smiciklas K.D., Walker P.M. et Kelley P.M. (2002).** Utilization of Compost (Food, Paper, Landscape and Manure) in Row Crop Production. Department of Agriculture and Health Sciences, Illinois State University, USA.
- Smith S.E. et Bowen G.D. (1979).** Soil temperature, mycorrhizal infection and nodulation of *Medicago trunculata* and *Trifolium subterraneum*. *Soil Biology and Biochemistry*, **11** : 469-473.
- Smith S.E. et Gianinazzi-Pearson V. (1988).** Physiological interactions between symbiots in vesicular-arbuscular mycorrhizal plants. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, **39** : 221-244.
- Smith S.E. et Read D.J. (2008).** Mycorrhizal Symbiosis, 3rd edn. Academic Press, London.
- Staal M., F. Maathuis J.M., Elzenga T.M, Odberbeek J.H.M. et Prins H.B.A. (1991).** Na⁺/H⁺ antiport activity of the salt-tolerant *Plantago maritime* and the salt-sensitive *Plantago media*. *Physiologia Plantarum*, **82** : 179-184.
- Sumner M. (2000).** Handbook of soil science. Boca Raton: CRC Press. 2148 p.
- Sy A., Giraud E., Jourang P., Garcia N., Willems A., de Lajudie P., Prin Y., Neyra M., Gillis M., Boivin-Masson C. et Dreyfus B. (2001).** Methylophilic *Methylobacterium* bacteria nodulate and fix nitrogen in symbiosis with legumes. *Journal of Bacteriology*, **183** : 214-220.

- Taffouo V.D., Wamba O.F., Youmbi E., Nono G.V., Akoa A. (2010).** Growth, yield, water status and ionic distribution response of three bambara groundnut (*Vigna subterranea* (L.) Verdc.) landraces grown under saline conditions. *International Journal of Botany*, **6**: 53-58.
- Taïbi K., Taïbi F., Abderrahim L.A., Ennajah A., Belkhodja M. et Mulet J.M. (2016).** Effect of salt stress on growth, chlorophyll content, lipid peroxidation and antioxidant defence systems in *Phaseolus vulgaris* L. *South African Journal of Botany*, **105**: 306 - 312.
- Talaat N.B. et Shawky B.T. (2011).** Influence of arbuscular mycorrhizae on yield, nutrients, organic solutes, and antioxidant enzymes of two wheat cultivars under salt stress. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, **174**: 283-291.
- Tanji K.K. (2004).** Salinity in the soil environment. Chap 2, p 21-51. In A. Läuchli, et U. Lüttig (ed.), *Salinity : environment-plants-molecules*. Kluwer, Dordrecht. Netherlands.
- Tejada M., Garcia C., Gonzalez J.L. et Hernandez M.T. (2006).** Use of organic amendment as a strategy for saline soil remediation: Influence on the physical, chemical and biological properties of soil. *Soil Biology and Biochemistry*, **38**: 1413-1421.
- Thrall P.H., Millsom D.A., Jeavons A.C., Waayers M., Harvey G.R., Bagnall D.J et Brockwell J. (2005).** Seed inoculation with effective root-nodule bacteria enhances revegetation success. *Journal of Applied Ecology*, **42**: 740-751.
- Tian C.Y., Feng G., Li X.L. et Zhang F.S. (2004).** Different effects of arbuscular mycorrhizal fungal isolates from saline or non-saline on salinity tolerance of plants. *Applied Soil Ecology*, **26**: 143-148.
- Tobe K., Xiaoming L. et Omasa K.I. (2000).** Seed Germination and Radicle Growth of a Halophyte, *Kalidium caspicum* (*Chenopodiaceae*). *Annual of Botany*, **85**: 391-396.
- Trouvelot A., Kough J.L. et Gianinazzi-Pearson V. (1986).** Mesure du taux de mycorhization VA d'un système racinaire. Recherche de méthodes d'estimation ayant une signification fonctionnelle. In: Gianinazzi-Pearson V, Gianinazzi S (eds) *Physiology and genetics aspects of mycorrhizae*. INRA, Paris, pp. 217-221.
- Trujillo M.E., Willems A., Abril A., Planchuelo A.M. et al. (2005).** Nodulation of *Lupinus albus* by strains of *Ochrobactrum lupini* nov. sp. *Applied and Environmental Microbiology*, **71** : 1318-1327.
- Tsegay B.A. et Gebreslassie B. (2014).** The effect of salinity (NaCl) on germination and early seedling growth of *Lathyrus sativus* and *Pisum sativum* var. *abyssinicum*. *African Journal of Plant Science*, **8** (5): 225-231.
- Turan M.A., Elkarim A.H.A., Taban N. et Taban S. (2009).** Effect of salt stress on growth, stomatal resistance, proline and chlorophyll concentrations on maize plant. *African Journal of Agricultural Research*, **4**: 893-897.

- Upadhyay R.K. et Panda S.K. (2005).** Salt tolerance of two aquatic macrophytes *Pistia stratiotes* and *Salvinia molesta*. *Biology of Plant*, **49**: 157-159.
- Valverde A., Velásquez E., Fernández-Santos F., Vizcaíno N., Rivas R., Mateos P.F., et al. (2005).** *Phyllobacterium trifolii* sp. nov. nodulating *Trifolium* and *Lupinus* in Spanish soils. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, **55** : 1985-1989.
- Vandamme P. et Coenye T. (2004).** Taxonomy of the genus *Cupriavidus*: a tale of lost and found. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology* **54**: 2285-2289.
- Vicente O., Boscaiu M., Naranjo M.A., Estrelles E., Belles J.M. et Soriana P. (2004).** Responses to salt stress in the halophyte *Plantago crassifolia* (*Plantaginaceae*). *Journal of Arid Environment*, **58**: 463-481.
- Viégas R.A., Fausto M.J.M.F., Silveira J.A.G., Queiroz J.E.Q. (2004).** Growth and total N content of *Prosopis juliflora* (SW) D. C. are stimulated by mild NaCl level. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, **16**: 65-68.
- Von Maydell H.J. (1983).** Arbres et arbustes du Sahel. Leurs caractéristiques et leurs utilisations. Eschborn: Schriftenreihe der GTZ N° 147, 531 pp.
- Walker D.J. et Bernal P.M. (2008).** The effects of olive mill waste compost and poultry manure on the availability and plant uptake of nutrients in a highly saline soil. *Bioresource Technology*, **99** : 396-403.
- Wall L.G. (2000).** The actinorhizal symbiosis. *Journal of Plant Growth Regulation*, **19**: 167-182.
- Walpola B.C. et Arunakumara K.K.I.U. (2010).** Effect of salt stress on decomposition of organic matter and nitrogen mineralization in animal manure amended soils. *Journal of Agricultural Science*, **5** : 9-18.
- Wang L., Sun X., Li T.S., Zhang W. et Zhai P. (2014).** Application of organic amendments to a coastal saline soil in North China: effects on soil physical and chemical properties and tree growth. *PLoS ONE*, **9** (2): e89185.
- Warembourg F.R., Montange D. et Bardin R. (1982).** The simultaneous use of $^{14}\text{CO}_2$ and $^{15}\text{N}_2$ labelling techniques to study the carbon and nitrogen economy of legumes grown under natural conditions. *Physiology of Plant*, **56** : 46-55.
- Werner J.E., Finkelstein R.R. (1995).** *Arabidopsis* mutants with reduced response to NaCl and osmotic stress. *Physiologia Plantarum*, **93** : 659-666.
- Wilson C. et Shannon M.C. (1995).** Salt-induced Na^+/H^+ antiport in root plasma membrane of glycophytic and halphytic species of tomato. **118** : 651-659.

- Wong V.N.L., Dalal R.C. et Greene R.S.B. (2009).** Carbon dynamics of sodic and saline soil following gypsum and organic material additions: a laboratory incubation. *Applied Soil Ecology*, **41**: 29-40.
- Yaduvanshi N.P.S. (2001).** Effect of five years of rice-wheat cropping and NPK fertilizer use with and without organic and green manures on soil properties and crop yields in a reclaimed sodic soil. *Journal of the Indian Society of Soil Science*, **49** (4): 714-719.
- Yeo A.R. (1983).** Salinity resistance: physiologies and price. *Physiologia plantarum*, **58**: 214-222.
- Yokoi S., Quintero F.J., Cubero B., Ruiz M.T., Bressan R.A., Hasegawa P.M., Pardo J.M. (2002).** Differential expression and function of *Arabidopsis thaliana* NHX Na⁺/H⁺ antiporters in the salt stress response. *Plant Journal*, **30** : 529-539.
- Young J.M., Kuykendall L.D., Martinez-Romero E., Kerr A. et Sawada H. (2003).** Classification and nomenclature of *Agrobacterium* and *Rhizobium* - a reply to Farrand et al. (2003). *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, **53**: 1689-1695.
- Zahran H.H. (1999).** Rhizobium-legume symbiosis and nitrogen fixation under severe conditions and in an arid climate. *Microbiol and Molecular Biology Review*, **63**: 968-989.
- Zeng N. (2003).** Drought in the Sahel. *Science*, **302**: 999-1000.
- Zhang H.X. et Blumwald E. (2001).** Transgenic salt-tolerant tomato plants accumulate salt in foliage but not in fruit. *Nat Biotechnology*, **19**:765-768.
- Zhang H.X., Hodson J.N., Williams J.P. et Blumwald E. (2001).** Engineering salt tolerant Brassica plants: characterization of yield and seed oil quality in transgenic plants with increased vacuolar sodium accumulation. *Proc. Natl. Acad. Sci.* **98** :12832-12836.
- Zhu J.K. (2002).** Salt and drought stress signal transduction in plants. *Annual Review of Plant Biology*, **53**: 247-273.
- Zhu J.K. (2007).** Plant Salt Stress. Encyclopedia of Life Sciences, John Wiley & Sons, Ltd. Pp. 1-3

ANNEXES

ANNEXES

Annexe 1 : Article publié

academicJournals

Vol. 15(37), pp. 2017-2027, 14 September, 2016
DOI: 10.5897/AJB2016.15518
Article Number: F4876A060522
ISSN 1684-5315
Copyright © 2016
Author(s) retain the copyright of this article
<http://www.academicjournals.org/AJB>

African Journal of Biotechnology

Full Length Research Paper

Germination, growth and physiological responses of *Senegalia senegal* (L.) Britton, *Vachellia seyal* (Delile) P. Hurter and *Prosopis juliflora* (Swartz) DC to salinity stress in greenhouse conditions

Dioumacor Fall^{1,2,3*}, Niokhor Bakhom^{2,3}, Fatoumata Fall^{2,3,4}, Fatou Diouf^{2,3}, Mamadou O. Ly¹, Mayécour Diouf^{1,5}, Djamel Gully⁶, Valérie Hocher⁶ and Diégane Diouf^{2,3,4}

¹Centre National de Recherches Forestières (CNRFF)/Institut Sénégalais de Recherches Agricoles (ISRA), Route des Pères Maristes, BP 2312, Dakar, Sénégal.

²Laboratoire Commun de Microbiologie IRD/ISRA/UCAD (LCM), Centre de Recherche de Bel-Air, BP 1386, Dakar, Sénégal.

³Laboratoire Mixte International Adaptation des Plantes et Microorganismes Associés aux Stress Environnementaux (LAPSE), BP 1386, Dakar, Sénégal.

⁴Département de Biologie Végétale, Université Cheikh Anta Diop de Dakar, BP 5005, Dakar, Sénégal.

⁵Centre de Recherches Zootechniques (CRZ) / Institut Sénégalais de Recherches Agricoles (ISRA), BP 2330, Kolda, Sénégal.

⁶Laboratoire des Symbioses Tropicales et Méditerranéennes (LSTM)/Institut de Recherche pour le Développement (IRD) TA A-82/J, Campus International de Baillarguet, 34398 Montpellier, France.

Received 9 June, 2016; Accepted 18 August, 2016

Salinity is among the most widespread environmental threats to global plant production, especially in arid and semi-arid climates. Thus, the selection of salt tolerant species is necessary for sustainable plant productivity. The purpose of this study was to measure and understand the salt tolerance of three multipurpose trees used in reforestation programs in many Sahelian countries (*Senegalia senegal*, Syn. *Acacia senegal*; *Vachellia seyal*, Syn. *A. seyal*, and *Prosopis juliflora*). The effect of salinity was evaluated at seed germination stage on Petri dishes containing water agar (0.9%, w/v) with seven concentrations of NaCl (0, 86, 171, 257, 342, 428, and 514 mM). Our results showed that all the species had a germination rate higher than 85% at 257 mM. However, it decreased at 342 mM with a reduction of 70 and 20%, respectively for *S. senegal* and *V. seyal*. For plants growth and physiological responses, seedlings were individually cultivated in plastic bags (25×12 cm) containing non-sterile soil and watered with four salt solutions (0, 86, 171 and 257 mM NaCl). Four months after the plants' cultivation, the results showed that for all species, the salinity reduced significantly the height, the collar diameter, the shoot and root dry biomass as well as the total chlorophyll, K⁺ and K⁺/Na⁺ ratio. In the meantime, proline content, Cl⁻ and Na⁺ accumulation in leaves were increased. It was also found that *S. senegal* and *V. seyal* tolerated high concentrations of NaCl (257 mM) and developed physiological and molecular mechanisms, such as salt tolerance genes (NHX1), which allow them to be considered as moderated salt tolerant species and seemed to be potential species for the restoration of salt-affected land as *P. juliflora*.

Key words: Multipurpose leguminous trees, abiotic stress, salt tolerance, Senegal.

Annexe 2 : Articles en cours de préparation

Article 1

Cet article sera soumis dans *Journal of Soil and Water Conservation*

Fall D., Bakhoun N., Fall F., Diouf F., Diouf D. **The reuse of peanut shells for restoration of chemical characteristics of salt-affected soils and improvement of trees growth in greenhouse conditions**

Abstract

Salinization causes degradation of biological, chemical and physical properties of soils particularly fertility, which leads to the decrease of crops yield and the degradation of forest ecosystems. Salty soils reclamation can be achieved with agro-biological methods, such as organic amendments and afforestation with salt tolerant species. Thus, our work aimed to contribute to the restoration of saline soils in the central part of Senegal by agro-biological tools. Experiments were achieved to assess the effect of peanut shells on *Senegalia senegal* (L.) Britton, *Vachellia seyal* (Delile) P. Hurter and *Prosopis juliflora* (Swartz) DC growth in saline conditions and soils characteristics. Seedlings were individually cultivated in plastic bags containing a mixture of non saline soil from Sadioga (Senegal peanut Basin) and crushed peanut shells. Four doses of peanut shells (0, 4, 6, 8 t/ha) of the variety 73-33 were tested. Salt stress was gradually applied (to avoid osmotic shock) after one month of culture at a rate of 2,5 g/l NaCl per day until concentrations of 0, 5, 10, 15 g/l NaCl were reached. After 3 months of salt stress, analysis of variance showed that peanut shells application improved seedlings growth (height, collar diameter, shoots and root biomass), physiological responses (chlorophyll and proline contents) and soil chemical properties (carbon, nitrogen, phosphorus contents, pH, total microbial activity, exchangeable cations and capacity of exchangeable cation) and reduced soil electrical conductivity. Four tons per hectare of peanut shells increased nodulation and mycorrhization of seedlings, while 6 and 8 T/ha reduced. In presence of high concentrations of NaCl (257 mM), the high dose of peanut shells (8 T/ha) reduced seedlings growth. Our results showed that organic amendments with peanut shells improve plants growth under saline conditions and salty soils fertility. Nevertheless, long-term field trials are needed to confirm our findings.

Keywords: Organic amendment, saline soils reclamation, *Senegalia senegal*, *Vachellia seyal*, *Prosopis juliflora*

Article 2

Cet article sera soumis dans *Symbiosis*

Fall D., Bakhom N., Fall F., Diouf F., Diouf D. Arbuscular Mycorrhizal Fungi (AMF) and rhizobia improve *Senegalia senegal* (L.) Britton, *Vachellia seyal* (Delile) P.J.H. Hurter and *Prosopis juliflora* (Swartz) DC tolerance to salinity in greenhouse conditions

Abstract

In Senegal, 1.7 million ha of the 3.8 million ha of agricultural land are affected by salinity, which leads to decrease of crops yield and the degradation of forest ecosystems. Salty soils reclamation can be achieved by biological methods, such as afforestation of degraded lands with salt tolerant plants. Our study aimed to select the best microbial inoculum for improving salt tolerance of *Senegalia senegal*, *Vachellia seyal* and *Prosopis juliflora*. Thus, the effect of microbial inoculation on morphological and physiological traits of plants was assessed in greenhouse conditions. Seedlings were individually cultivated in plastic bags containing non sterile sandy soil. For each species, inoculation was performed at transplantation with 5 ml of bacterial mixture comprising two selected rhizobial strains (ORS 3574 and ORS 3593 for *S. senegal*; ORS 3356 and ORS 3359 for *V. seyal* ; Pj 34 and Pj 36 for *P. juliflora*), and 20 g of a cocktail of three arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) strains (*Glomus aggregatum*, *G. fasciculatum*, *Rhizophagus irregularis*). After one month, seedlings were gradually watered with four saline solutions (0, 5, 10, 15 g/l NaCl) during 5 months. Results showed that the positive effect of microbial inoculation on seedlings growth (collar diameter, height, shoot and root biomass) depends on plant species, NaCl concentration and type of inoculum. Whatever, the plant species, the highest growth of seedlings was obtained with dual inoculation (rhizobia + AMF). However, any significant effect of inoculation was noted on relative water content excepted for *V. seyal* seedlings grown on 15 g/l NaCl and inoculated with rhizobia and AMF. Leaf water potential became significantly more negative in *P. juliflora* seedlings double inoculated and cultivated in high NaCl concentrations (10 and 15 g/l). Nodulation and root mycorrhizal colonization were higher in seedlings inoculated with rhizobia and AMF. Our results showed that microbial inoculation particularly dual inoculation with selected rhizobial and AMF strains improved *S. senegal*, *V. seyal* and *P. juliflora* growth in saline conditions. Nevertheless field trials are needed to improve the successful of saline soils revegetalization.

Keywords: Mycorrhiza, rhizobia, leguminous trees, Salinity tolerance, Biotechnologies.

Article 3

Cet article sera soumis dans *Agroforestry System*

Fall D., Bakhoun N., Fall F., Diouf F., Faye M., Ndiaye C., Diouf D. Combination of microbial inoculation and peanut shells improves *Senegalia senegal* (L.) Britton, *Vachellia seyal* (Delile) P JH Hurter and *Prosopis juliflora* (Swartz) DC growth under saline conditions

Abstract

Salinization causes the loss of soil fertility, which leads to the decrease of plants development, crops yield and the degradation of the ecosystem. Salty soils reclamation can be achieved simultaneously by adding organic matter to remove the soluble sodium of soil and revegetalization by salt tolerant species. Our study aimed to assess in greenhouse and natural conditions, the effect of the combination of microbial inoculation and peanut shells on *Senegalia senegal*, *Vachellia seyal* and *Prosopis juliflora* growth under salinity conditions. Seedlings were individually cultivated in plastic bags containing a mixture of non-sterile sandy soil and 6 T/ha of peanut shells *var* 73-33. Seedlings were inoculated at transplantation with 5 ml of bacterial mixture of two rhizobial strains (ORS 3574 and ORS 3593 for *S. senegal*; ORS 3356 and ORS 3359 for *V. seyal* ; Pj 34 and Pj 36 for *P. juliflora*), and 20 g of a cocktail of three arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) strains (*Glomus aggregatum*, *G. fasciculatum*, *Rhizophagus irregularis*). After one month, seedlings were gradually watered with four saline solutions (0, 5, 10, 15 g/l NaCl) during 4 months. Seedlings grown on 0 g/l NaCl were planted in Sadioga (Fatick region). Results showed that microbial inoculation (rhizobia + AMF), peanut shells and their combination improved height, collar diameter, shoot and root biomass, nodulation, root mycorrhizal colonization and the survival rate of *S. senegal*, *V. seyal* and *P. juliflora* seedlings grown in greenhouse and after 4 months after plantation in natural habitat under saline conditions. However, any significant differences were found between seedlings amended with peanut shells only and those inoculated and amended. The highest plants growth was still obtained with the combination of microbial inoculation and peanut shells, whatever the species. Our results showed that the combination of microbial inoculation and peanut shells improved *S. senegal*, *V. seyal* and *P. juliflora* growth in saline conditions. Nevertheless, it is necessary to follow the survival and growth of plants on natural conditions for several years to evaluate the effect of this combination.

Keywords: Mycorrhiza, rhizobia, organic amendment, leguminous trees, Salt tolerance

Annexe 3 : Résumés de conférence

Microbial inoculation and application of peanut shell: promising technologies to improve salty soils fertility and the growth of *Acacia senegal* (L.) Willd. and *Prosopis juliflora* (Swartz) DC under saline conditions

FALL Dioumacor^{1,2,3}, Niokhor BAKHOUM^{2,3}, Fatoumata FALL^{2,3}, Fatou DIOUF^{2,3}, Valérie HOCHER^{3,4}, Diégane DIOUF^{2,3,5}

¹ISRA/CNRF, Route des Pères Maristes, BP 2312, Dakar-Sénégal; ²LCM-Laboratoire Commun de Microbiologie IRD/ISRA/UCAD, Centre de Recherche de Bel-Air, BP 1386, Dakar-Sénégal; ³Laboratoire Mixte International Adaptation des Plantes et microorganismes associés aux Stress Environnementaux (LAPSE); ⁴IRD, LSTM, TA A-82/J, Campus International de Baillarguet 34398 Montpellier, France ; ⁵Département de Biologie Végétale, Université Cheikh Anta Diop de Dakar, BP 5005, Dakar-Sénégal

E-mail : dioumacor.fall@isra.sn / dioumacorfall@yahoo.fr

Abstract

In Senegal, 1.7 million ha of the 3.8 million ha of agricultural land are affected by salinity. Salinization causes degradation of biological, chemical and physical properties of soils with a consequent the reduction of soil fertility which leads to the decrease of crops yields and sometimes the loss of natural vegetation. However, many technologies were used to reduce soils salinization, and also for the restoration and valorization of salt affected lands. Thus, the aim of our work was to contribute to the restoration of saline soils by agro-biological tools. Experiments were achieved to assess the effect of (i) microbial inoculation (rhizobia and mycorrhizal fungi) on *Acacia senegal* and *Prosopis juliflora* growth in saline conditions and (ii) peanut shell on *A. senegal* and *P. juliflora* growth in saline conditions and soils characteristics. In the first experience seedlings were inoculated at transplantation with 5 ml of bacterial preculture of a mixture of 2 rhizobial strains (ORS 3574 and ORS 3593 for *A. senegal*; Pj 34 and Pj 36 for *P. juliflora*), and 20 g of fungal inoculums mixed of three strains (*Glomus aggregatum*, *G. fasciculatum* and *Rhizophagus irregularis*). Seedlings were individually cultivated in plastic bags (25 x 12 cm) containing 1300 g a mixture of unsalted soil from Sadioga (Senegal peanut Bassin). In the second experience, soil was mixed with crushed peanut shell. Four doses of peanut shell (0, 4, 6, 8 T/ha) of the variety 73-33 were tested. To avoid osmotic shock, salt stress was gradually applied after one month of culture at a rate of 2.5g/l (43 mM). Plants were normally watered after with the concentrations of NaCl required (0, 86, 171, 257 mM) during 3 months. Analysis of variance showed that NaCl had a negative effect on height, root and shoot biomass, relative water content and leaf water potential, soils carbon, nitrogen, phosphorus content, pH and total microbial activity (FDA). Moreover, low concentrations NaCl (86 mM) seemed to stimulate *P. juliflora* growth. Microbial inoculation increased significantly shoot dry biomass and height at 86, 171 and 257 mM of NaCl. However, the best growth was obtained with mycorrhizal and dual inoculation. Peanut shell improved growth and their water status of *A. senegal* and *P. juliflora* plants under saline conditions. Similarly, soils chemical and microbial characteristics were improved by peanut shell, which had a significant negative effect on plants nodulation and mycorrhization, and soil spores density. However, in presence of high concentrations of NaCl (257 mM), the high doses of peanut shell (8 T/ha) reduced plants growth. Our results showed that microbial inoculation and organic amendments with peanut shell can improve plants growth under saline conditions and salty soils fertility.

Keywords: Microbial inoculation, Peanut shell, *A. senegal*, *P. juliflora*, growth, Salinity tolerance, Biotechnologies.

Ce travail a été présenté au VIIème Colloque de l'Association Francophone d'Ecologie Microbienne (AFEM), 3-6 novembre 2015 Anglet (France)

3^{èmes} journées du LAPSE

1-2 Avril 2015

Campus UCAD2, Dakar, Sénégal

Fiche d'Inscription

A renvoyer à webmaster.lapse@ird.fr avant le 28 février 2015

Prénom : Dioumacor

Nom : FALL

Laboratoire/Institution : LCM-Laboratoire Commun de Microbiologie IRD/ISRA/UCAD ;
ISRA/CNRF/LCM

Participera à la journée du 1 Avril 2 Avril (les deux jours)

Propose une communication **Orale**

Titre: Arbuscular Mycorrhizal Fungi and rhizobia improve *Acacia senegal* (L.) Willd. and *Prosopis juliflora* (Swartz) DC seedlings growth and water status under saline conditions in greenhouse

FALL Dioumacor^{1,2,3} Niokhor BAKHOUM^{2,3}, Fatoumata FALL^{2,3}, Fatou DIOUF^{2,3}, Valérie HOCHER^{3,4}, Diégane DIOUF^{2,3,5}

¹ISRA/CNRF, Route des Pères Maristes, BP 2312, Dakar-Sénégal; ²LCM-Laboratoire Commun de Microbiologie IRD/ISRA/UCAD, Centre de Recherche de Bel-Air, BP 1386, Dakar-Sénégal; ³Laboratoire Mixte International Adaptation des Plantes et microorganismes associés aux Stress Environnementaux (LAPSE); ⁴IRD, LSTM, TA A-82/J, Campus International de Baillarguet 34398 Montpellier, France ; ⁵Département de Biologie Végétale, Université Cheikh Anta Diop de Dakar, BP 5005, Dakar-Sénégal

Email: dioumacor.fall@isra.sn / dioumacorfall@yahoo.fr

Résumé (Max 400 mots):

In Senegal, 1.7 million ha of the 3.8 million ha of agricultural land are affected by salinity, which leads to the decrease of crops yield and the degradation of forest ecosystems. Salty soils reclamation can be achieved with biological methods, such as afforestation of degraded lands with salt tolerant plants. Our study aimed to assess in greenhouse conditions, the effect of microbial inoculation on salt tolerance of *Acacia senegal* and *Prosopis juliflora*. *A. senegal*

and *P. juliflora* seedlings were individually cultivated in plastic bags (25 x 12 cm) containing non sterile sandy soil. Seedlings were inoculated at transplantation with 5 ml of bacterial preculture of a mixture of 2 rhizobial strains (ORS 3574 and ORS 3593 for *A. senegal*; Pj 34 and Pj 36 for *P. juliflora*), and 20 g of a cocktail of three arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) strains (*Glomus aggregatum*, *G. fasciculatum* and *Rhizophagus irregularis*). After one month, plants were gradually watered with four (4) saline solutions (0, 86, 171, 257 mM NaCl) during 4 months. Results showed that microbial inoculation increased significantly height, collar diameter and shoot dry biomass of seedlings in saline conditions. A significant effect was obtained on shoot dry biomass of *A. senegal* plants at 0 and 257 mM with all inoculation treatments, and on seedlings height at 171 and 257 mM with only dual inoculation. Any significant effect of inoculation was noted on root dry biomass, relative water content (RWC) and leaf water potential (LWP). Similarly, microbial inoculation increased significantly shoot dry biomass and height of *P. juliflora* plants at 86, 171 and 257 mM. However, the highest growth was obtained with mycorrhizal and dual inoculation treatments. Any significant effect of inoculation was showed on root dry biomass and RWC; nevertheless LWP was significantly decreased. Our results showed that microbial inoculation particularly dual inoculation with selected rhizobial and mycorrhizal fungi strains improved *A. senegal* and *P. juliflora* plants growth in saline conditions. Our findings are useful to improve the successful of soil reclamation practices.

Keywords: Arbuscular mycorrhizal fungi, rhizobia, *Acacia senegal*, *Prosopis juliflora*, water status, salinity tolerance



L'inoculation microbienne et l'application de la coque d'arachide: des technologies novatrices pour améliorer la croissance de *Acacia senegal* (L.) Willd. et *A. seyal* et la fertilité des sols salés



Dioumacor FALL^{1,2,3}, Niokhor BAKHOUM², Fatoumata FALL^{2,3,4}, Mamadou O. LY¹, Mayécor DIOUF^{1,5}, Diégane DIOUF^{2,4,6}

1: ISRA/CNRF, Route des Pères Maristes, BP 3120; 2: LCM-IRD/ISRA/UCAD, Bel-air, BP 1386; 4: LMI-LAPSE; 5: ISRA/CRZ Kolda, 6: Département de Biologie Végétale, FST-UCAD, BP 5005;

Contact: Dr Dioumacor FALL, E-mail: dioumacor.fall@isra.sn / dioumacorfall@yahoo.fr; Tél: +221 77 532 37 91

INTRODUCTION



Site d'étude: Sadioga, Rég. Fatick

Au Sénégal, la salinisation des terres affecte 1 700 000 ha de terres soit 45% des terres arabes (LADA, 2009). Elle entraîne une diminution de leur fertilité et une baisse de la productivité végétale. Notre étude a pour objectif global de contribuer à la restauration et à la valorisation des sols salés par des méthodes agro-biologiques, notamment le reboisement avec des légumineuses ligneuses à usages multiples modérément tolérantes au sel et l'utilisation de déchets organiques. Ce travail avait pour objectif d'évaluer l'effet de l'application de la coque d'arachide et de l'inoculation microbienne sur les caractéristiques chimiques et microbiologiques des sols salés et la croissance de *A. senegal* et *A. seyal*.



A. senegal

A. seyal

MATERIEL ET METHODES



Préparation de l'inoculum microbien

Après avoir sélectionné l'inoculum microbien (combinaison rhizobium et champignon endomycorhizien) et la dose de la coque d'arachide (6 T/ha) qui permettent la meilleure croissance, la combinaison de ces deux technologies a été évaluée en serre et en milieu réel.

En serre: les plants ont été cultivés dans des gaines contenant du sol non salé et non stérile. Quatre niveaux de salinité (0, 5, 10, 15 g/l) ont été étudiés. Pour chaque espèce et pour chaque niveau de salinité, quatre traitements ont été appliqués : plants témoins (T), plants inoculés (In), plants amendés avec coque d'arachide (Ca) et plants inoculés et amendés avec coque d'arachide (InCa)



Préparation du mélange sol+coque d'arachide



En milieu réel: Pour chaque traitements, des plants de 4 mois en pépinière ont été plantés en début de saison des pluies (Aout 2015) sur une tanne herbeuse du site d'étude selon un dispositif randomisé avec un écartement de 5 m x 5 m.



Plantation dans notre site d'étude (Aout 2015)

RESULTATS ET DISCUSSION

En serre: L'inoculation microbienne, l'apport de coque d'arachide ou la combinaison inoculation coque d'arachide améliore la croissance (hauteur et biomasse aérienne) (Fig. 1 et Tableau 1) des plants en conditions de stress salin. L'apport de coque d'arachide seul ou la combinaison inoculation et coque d'arachide améliorent significativement la croissance des plants en pépinière. Cependant, aucune différence significative n'a été notée entre l'effet de la coque d'arachide seule et la combinaison et l'inoculation coque d'arachide. L'apport de coques d'arachide augmente significativement la teneur en carbone, en azote en phosphore, la capacité d'échange cationique, et l'activité microbienne total du sol. Elle diminue aussi la conductivité électrique et la teneur en sodium du sol

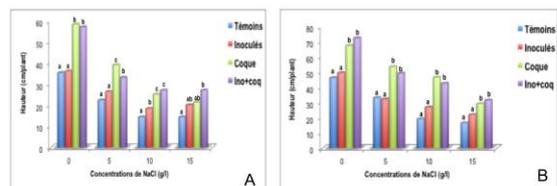
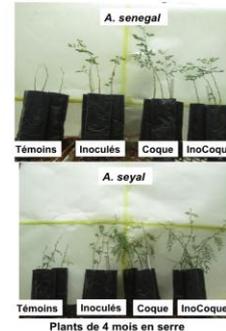


Figure 1 : Hauteur des plants de *A. senegal* (A) et *A. seyal* (B) cultivés pendant 4 mois en serre sous différentes conditions salines

Tableau 1 : Hauteur des plants de *A. senegal* et *A. seyal* cultivés pendant 4 mois en serre sous différentes conditions salines

Espèces	Traitements	Concentrations de NaCl (g/l)							
		0		5		10		15	
<i>A. senegal</i>	Témoins	1,53a	1,95a	0,85a	1,15a	0,41a	0,69a	0,40a	0,35a
	Inoculés	1,57a	1,72a	0,86a	1,42a	0,64a	1,00ab	0,70ab	0,94b
	Coque	4,04b	2,45a	2,44b	1,65a	1,58b	1,47c	0,88bc	0,69bc
	Ino+Coque	3,93b	2,30a	2,20b	1,86a	1,33b	1,01ab	1,10c	0,74bc
<i>A. seyal</i>	Témoins	2,15a	3,31a	0,92a	2,25a	0,32a	0,94a	0,23a	0,69a
	Inoculés	2,24a	4,10ab	1,28a	2,39a	0,57a	1,48a	0,32a	0,62a
	Coque	3,96b	5,09ab	2,19b	3,62b	1,80b	3,17b	1,17a	1,85b
	Ino+Coque	5,07c	5,78b	2,32b	4,87c	1,80b	3,88b	1,01a	1,64b

Pour chaque colonne de chaque espèce, les valeurs suivies par les mêmes lettres ne sont pas significativement différentes au seuil de 5% selon le test de Newman et Keuls



Plants de 4 mois en serre

En milieu réel: Les résultats montrent que l'apport de coque d'arachide et la combinaison inoculation et apport de coque d'arachide améliorent significativement la hauteur et le diamètre au collet des plants en milieu réel (Tableau 2). Ils ont respectivement permis une augmentation de la hauteur des plants de 30% et 42% chez *A. senegal*, 52% et 58% chez *A. seyal*, 53%. Les résultats montrent que le taux de reprise est supérieur à 55% pour tous les traitements et pour toutes les espèces (Fig. 2)

Tableau 2: Hauteur et diamètre au collet moyens des plants de *A. senegal* et *A. seyal* 4 mois après transplantation (Décembre 2015)

Espèces végétales	Traitements	Hauteur (cm)	Diamètre au collet (mm)
<i>A. senegal</i>	Témoins	30,56a	5,62a
	Inoculés	28,66a	6,11a
	Coque	39,55b	6,67a
	InoCoque	43,25b	8,08b
<i>A. seyal</i>	Témoins	29,88a	3,94a
	Inoculés	31,46a	4,32ab
	Coque	45,46a	5,24ab
	InoCoque	47,31b	5,72b



Plants 4 mois après plant en milieu réel (Décembre 2015)

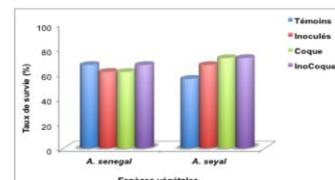


Figure 2 : Taux de reprise des plants après 4 mois après transplantation (Décembre 2015)

Pour chaque colonne de chaque espèce, les valeurs suivies par les mêmes lettres ne sont pas significativement différentes au seuil de 5% selon le test de Newman et Keuls

CONCLUSIONS ET BENEFICIAIRES DES RESULTATS

L'inoculation microbienne et l'apport de coques d'arachide améliorent significativement la croissance des *Acacia* en condition salines et la fertilité des sols salés. Le suivi du comportement des plants en milieu réel permettra de confirmer les résultats obtenus en serre. Les potentiels utilisateurs de nos résultats sont les décideurs politiques, les programmes et / ou projets de développement agricole, les ONG,...

l'actine et NHX1

ACTINE



NHX1

1 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100 110 120 130

F3 **R1**

Medicago GATGAGACACCTTTATGTATAGTCTTGTATTTGGGAGAGGTGTGTGAAATGATGCTACCTCAGTGGTCTTTTCAAATGCARATCAAGCTTTGATCTTAAACCACCTGAACCCCTTCATTTGCATTGCATT
Cicer GATGAGACACCTTTGTGTATAGTCTTGTGTTTGGAGAGGTGTGTGAAATGATGCTACCTCAGTGGTCTTTTCAAATGCARATCAAGCTTTGATCTTAAACCACCTGAACCCCTTCATTTGCATTGCATT
Vigna GATGAGACACCTTTGCTGTACAGTCTTGTATTTGGGAGGSGTGTGTGAAATGATGCTACCTCAGTGGTCTTTTCAAATGCARATCAAGCTTTGATCTTAAACCACCTGAACCCCTTCATTTGCATT
Glycine GATGAGACACCTTTACTGTACAGTCTTGTATTTGGGAGGSGTGTGTGAAATGATGCTACCTCAGTGGTCTTTTCAAATGCARATCAAGCTTTGATCTTAAACCACCTGAACCCCTTCATTTGCATT
Atriplex GATGAGACCCCTCTGCTTACAGTCTTGGTCTTTGGTGGGSGTGTGTGAAATGATGCTACCTCAGTGGTCTTTTCAAATGCARATCAAGCTTTGATCTTAAACCACCTGAACCCCTTCATTTGCATT
Arabidopsis GACGAGACACCTTTGCTTACAGTCTTGTATTCGGAGAGGSGTGTGTGAAATGATGCTACCTCAGTGGTCTTTTCAAATGCARATCAAGCTTTGATCTTAAACCACCTGAACCCCTTCATTTGCATT
Consensus GATGAGACaCCTtTgcTgTAcAGTCTcGTaTtLGG_gAgGGTGTGTGAAATGATGCTAcTcAGTgTgcTtTcAAAGcArTtLcAaAgcTTTGAcCTcaaccaaaT_gAccac..AatLgctTtGcALT

131 140 150 160 170 180 190 200 210 220 230 240 250 260

R2

Medicago TCTTGGCACCCTTCGTATTTGTTGTAGCAGCACACTCCTTGGCGTGTGACAGGCTGCTCAGTGGCTATGTTATTAAAGCTGTACATTGGCAGGCACCTCACAGATCGTGGGTTGCTCTAT
Cicer TTTTGGCACCCTTCGTATTTGTTGTAGCAGCACACTACTTGGGCTTTTGACAGGCTGCTCAGTGGCTATGTTATTAAAGCTGTATATTGGCAGGCACCTCACAGATCGTGGGTTGCTCTAT
Vigna TTTTGGCACCCTTCGTATTTGTTGTAGCAGCACACTGCTTGGGCTTTTGACAGGCTGCTCAGTGGCTATGTTATTAAAGCTGTATATTGGCAGGCACCTCACAGATCGTGGGTTGCTCTAT
Glycine TTTTGGCACCCTTCGTATCTGTTTACCCAGCACACTTGTCTGGGCTTTGGCTGGCTACTTACGCTTACATTTATTAAAGCTGTATATTGGCAGGCACCTCACAGATCGTGGGTTGCTCTAT
Atriplex TTATGGCACCCTTCATATTTGTTTATCCAGCACACTTACTTGGAGCATTTACGGCTTCTCAGTGGCTACATTTATTAAAGCTGTACTTTGGCAGGCACCTCACAGATCGTGGGTTGCTCTAT
Arabidopsis TTCTTGGACACCTTCGTATTTGTTTCTCCTAAGTACTTGTCTGGTGGCTGACACGGCTGATAGTGGCTATGTTATTAAAGCTGTACTTTGGCAGGCACCTCACAGATCGTGGGTTGCTCTAT
Consensus TctTgGcAcCtTcTgTATtTgTtT..TgcAGGcAc..TgCTTGG_gt..ttgac_gGctTgcT..AGLgCtTAcATTATcAAAGcTgTAcATTGGaAGGcAcTc..AcAGAcCgTGGGTTGcCtLcAT

261 270 280 290 300 310 320 330 340 350 357

R3

Medicago GATGCTAATGGCATACCTCTCTATATGCTGGCTGAGTAACTATCTGAGTGGCATTCTTACCGTATTCCTTTGTGGTATTGTATGCTCATTAT
Cicer GATGCTAATGGCATACCTCTCTATATGCTGGCTGAGTATCCTATCTGAGTGGTATTCTACGGTATTCCTTTGTGGTATTGTATGCTCATTAT
Vigna GATGCTAATGGCATACCTTACATGCTAGCTGARTATGCTATCAGTGGCATTCTACCTGATTCCTTTGTGGGATTGTATGCTCATTAT
Glycine GATGCTAATGGCATACCTTCCACATCTGGCTGARTATGGTATCTGAGTGGCATTCTACCTGATTCCTTTGTGGGATTGTATGCTCATTAT
Atriplex GATGCTAATGGCATACCTTACATGCTGCTGACTTTTCTATTTGAGTGGARTTCTTACCTGATTCCTTTGTGGGATTGTATGCTCATTAT
Arabidopsis GATGCTAATGGCATACCTTCTTATATGCTTGGTGGCTTTTCGACTTGGCAGGATCTCTACCTGATTCCTTTGTGGGATTGTATGCTCATTAT
Consensus GATGCTAaTGGcTAcCT..TccTAcATgCT..GCTGAGatTat..ctAcTgAGLGG..ATLcTcAcLcGTaTtTcTGTGGgATTGTAtGtCtCATTAc

Annexe 4 : Séquences de l'actine

Chez *S. senegal* (765 pb)

TTTAAAGCTGGATTTGCTGGAGACGATGCCCCAGAGCTGTGTTTCCAGTATTGTTGGCAGACCCCGGCATACCGGTGTTATG
GTTGGTATGGGTTCAGAAAAGATGCATATGTAGGTGATGAAGCCAGTCTAAAAGAGGTATTCTTACTTTGAAGTACCCATTGA
GCATGGTATAGTCAGTAACTGGGATGACATGGAAAAGATTTGGTATCACACATTTTACAATGAGCTTCGTGTTGCTCCTGAGG
AACACCCAGTGCCTTCTCACTGAGGCTCCTCTGAACCCAAAGGCCAACAGAGAGAAGATGACTCAAATCATGTTTGAGACCTTT
AATGTCCCTGCCATGTATGTGGCCATCCAGGCTGTTCTCTCTATATGCTAGTGGTCGTACGACTGGCATTGTTTTGGACTC
TGGTGATGGTGTGAGCCACACTGTGCCAATTTATGAGGGATATGCACCTCCTCATGCTATTCTCCGATTGGATCTTGCCGGTC
GTTATCTGACTGATTCGTTGATGAAGATCCTGACTGAAAGAGGGTACATGTTTACTACCTCTGCTGAGCGGAAATTTGCCGT
GACATGAAGGAGAACTTGCATATGTTGCTTTAGACTATGAGCAAGAGCTTGAGACTGCAAAGACCAGCTCTTCAGTGGAGAA
AACTACGAgCTTCTGATGGACAGGTTATTACAATTGGAGCCGAgAGATTCCGTTGCCCGGAAGTTCTTTCCAGCCATCTA
TGATCGGAATGGAAGCTG

Chez *V. seyal* (587 pb)

TACAACCGGTATTGTTTTGGATTCTGGTGATGGTGTAGCCACACAGTTCTTATCTATGAGGGTTGTGCTCTCCACATGCCA
TCCTTCGTCTTGACCTGGCTGGCCGTGACCTTACTGAATACATGATGAAAATTCTGACTGAACGTGGGTATTTCATTTACCACA
TCAGCAGAGCGGAAATAGTGAGAGATGTGAAGGAAAAGCTCGCCTATATTGCACTTGATTATGAACAAGAACTAGAGACTGC
CAAGACCAGTTCTGCTGTGGAGAAGAGCTATGAGTTGCCTGATGGGCAAGTAATCACCATTGGTGCAGAGCGATTTCAGATGTC
CAGAGTCTGTTCCAACCATCCTTAATCGGTATGGAAGCAGCAGGCATTCATGAGACAACATACAACCTCCATCATGAAGTGT
GATGTTGACATCAGGAAAAGACCTGTACGGTAACATTGTCTCTGAGGTTCAACCATGTTTCTGGCATTGCTGATAGAAT
GAGCAAAGAGATTTCTGCATTAGCCCCAAGCAGCATGAAGATCAAGGTTGTTGCACCACCCGAGAGAAAAGTACAGTGTCTGGA
TCGGAA

Chez *P. juliflora* (586 pb)

TACAACCGGTATTGTTTTGGATTCTGGTGATGGTGTGAGCCACACGGTACCCATATATGAAGGGTATGCTCTCCCTCATGCAA
TTCTGAGGTTGGACCTTGCTGGTCTGATTTAACAGAGTACCTGATGAAAATTCTTACGGAGAGAGGATACTCTTTTACCACC
TCTGCCGAACGGGAAATGTCCTGATGTGAAGGAGAAATGGCATACTGCGCCCTTGATTTTGAACAAGAAATGGAGACTGC
CAAGAGTAGTTTCAGCAGTGGAGAAGAGTTATGAATTGCCTGACGGACAAGTCATTACCATAGGAGCTGAGAGTTCCGATGCC
CGGAAGTACTATTCCAGCCTTCTTAATTGGTATGGAGGCCACTGGAATCCATGAAACTACCTACAACCTCCATCATGAAATGT
GATGTTGATATTAGGAAGGATCTGTATGAAAATATTGTGCTCAGTGGTGGTTCAACAATGTTCCCTGGAATTGCTGATCGTAT
GAGCAAGGAAATCACTGCTCTTGCTCCGAGCAGCATGAAAATCAAGGTTGTCGCCACCCTGAGAGGAAAGTACAGTGTCTGGA
TCGGA

Résumé

Au Sénégal, 1 700 000 ha sur les 3 800 000 ha des terres arables sont salés. Cette salinisation des terres provoque une dégradation de leurs propriétés biologiques, chimiques et physiques entraînant une diminution de leur fertilité et la disparition du couvert végétal naturel. Une amélioration des propriétés des sols salés et de la tolérance à la salinité des plantes, faciliterait la restauration de ces terres. Ainsi, notre travail a pour objectif global d'évaluer les potentialités de restauration et de valorisation des terres salées dans la région de Fatick par une approche intégrée notamment la combinaison de méthodes agronomiques et biologiques. Les travaux entrepris répondaient à trois objectifs spécifiques : (i) évaluer les niveaux et les mécanismes de tolérance à la salinité de *Senegalia senegal* (Syn. *Acacia senegal*), *Vachellia seyal* (Syn. *Acacia seyal*) et *Prosopis juliflora*; (ii) déterminer la dose optimale de coques d'arachide var 73-33 capable d'améliorer les propriétés des sols salés et la croissance de ces espèces en conditions salines et (iii) évaluer l'effet combiné de l'inoculation microbienne et de l'apport de coques d'arachide sur leur croissance en serre et en milieu réel sous conditions salines. Pour la germination, les concentrations 0, 5, 10, 15, 20, 25 et 30 g/l de NaCl ont été testées par contre pour la croissance, nous avons testé 0, 5, 10 et 15 g/l. Les résultats du premier objectif ont montré que le stress salin réduit le taux de germination sur boîtes de *Petri*, la croissance, les teneurs en chlorophylles et en eau, le potentiel hydrique foliaire, l'accumulation de K^+ et le rapport K^+/Na^+ des plants cultivés sur du sol non stérile en serre. En revanche, une augmentation de l'accumulation de la proline, des ions Na^+ et Cl^- a été notée dans les mêmes conditions de salinité. Pour des concentrations de NaCl inférieures ou égales à 15 g/l, le taux de germination est environ 100% et la croissance est relativement importante. La présence du gène NHX1 montre leur aptitude à séquestrer les ions Na^+ dans la vacuole. L'apport des coques (0, 4, 6 et 8 T/ha) améliore la croissance des plants, les teneurs en C, N, P totaux et réduit la conductivité électrique et la salinité du sol en serre. Cependant, les doses 6 et 8 T/ha réduisent la nodulation et la mycorhization des plants. En présence de 15 g/l NaCl, l'amendement avec 8 T/ha semble inhiber la croissance des plants. La dose 6 T/ha a permis la meilleure croissance des plants en conditions salines. Les résultats du dernier objectif ont montré que l'inoculation microbienne (rhizobia seuls, CMA seuls ou rhizobia + CMA), les coques d'arachide (6 T/ha) et leur combinaison améliorent la croissance, la nodulation et la mycorhization des plants cultivés sous conditions salines en serre et en milieu réel. Cependant, aucune différence significative n'a été notée entre les plants amendés avec les coques seules et ceux inoculés et amendés. Toutefois, la meilleure croissance et le meilleur taux de survie ont été obtenus avec la combinaison inoculation microbienne et coques d'arachide. Nos résultats suggèrent que *S. senegal* et *V. seyal* présentent une tolérance à la salinité à l'image de *P. juliflora* et que la combinaison de l'inoculation microbienne (rhizobia + CMA) et des coques d'arachide var 73-33 (6 T/ha) permet d'augmenter leurs potentialités à restaurer les sols affectés par la salinité au Sénégal.

Thesis title: Contribution to the improvement of salt tolerance of *Senegalia senegal* (L.) Britton, *Vachellia seyal* (Delile) P. Hurter and *Prosopis juliflora* (Swartz) DC by microbial inoculation and peanut shells application

Summary

In Senegal, 1.7 million ha of the 3.8 million hectares of agricultural lands are salty. This salinization causes the degradation of soil biological, chemical and physical properties resulting to a decrease in fertility and the disappearance of natural vegetation. Improving the properties of saline soils and salt tolerance of plants will facilitate the restoration of these lands. Thus, the overall objective of our work was to evaluate the potential of restoration and improvement of saline lands in Fatick region through an integrated approach including the combination of agro-biological methods. The work had three specific objectives: (i) to assess the levels and mechanisms of salt tolerance of *Senegalia senegal* (Syn. *Acacia senegal*), *Vachellia seyal* (Syn. *Acacia seyal*) and *Prosopis juliflora*; (ii) to determine the optimal dose of peanut shells var. 73-33 able to improve the characteristics of salty soils and growth of these species under saline conditions and (iii) to evaluate the combined effect of microbial inoculation and peanut shells on growth greenhouse and natural environment under saline conditions. For germination, the concentrations 0, 5, 10, 15, 20, 25 and 30 g/l NaCl were tested and 0, 5, 10 and 15 g/l for seedlings growth. The results of the first objective showed that salt stress reduced the germination rate, growth, chlorophyll and water contents, leaf water potential, K^+ accumulation and K^+/Na^+ ratio of seedlings grown on non-sterile soil under greenhouse condition. In contrast, an increase of proline, Na^+ and Cl^- accumulation was noted in leaves. For NaCl concentrations lower than or equal to 15 g/l, germination rate was about 100% and seedlings growth was relatively important. The presence of NHX1 gene showed their ability to sequester Na^+ ions in vacuole. Peanut shells (0, 4, 6 and 8 T/ha) improved seedlings growth, soil C, N, P contents and reduced electrical conductivity and salinity of soil. However, 6 and 8 T/ha reduced nodulation and mycorrhization of seedlings. In presence of 15 g/l NaCl, the amendment with 8 T/ha seemed to inhibit seedlings growth. The dose 6 T/ha provided the better seedlings growth under saline conditions. The results of our last objective showed that microbial inoculation (rhizobia + AMF), peanut shells (6 T/ha) and their combination improved growth, nodulation and mycorrhizal of seedlings grown under saline conditions in greenhouse and in natural conditions. However, no significant differences were noted between seedlings amended with peanut shells only and those inoculated and amended. However, the best growth and survival rate were obtained with the combination of microbial inoculation and peanut shells. Our results suggest that *S. senegal* and *V. seyal* exhibit salinity tolerance as *P. juliflora* and the combination of microbial inoculation (rhizobia + AMF) and peanut shells var 73-33 (6 T/ha) allows to increase their potential to restore soils affected by salinity in Senegal.

Spécialité: Biotechnologies Végétales et Microbiennes et Amélioration des Plantes

MOT-CLES : Salinité, espèces forestières, matière organique, rhizobia, champignons mycorhiziens, Sénégal

ED-SEV, Faculté des Sciences et Techniques, Université Cheikh Anta DIOP, BP 5005, Dakar-Sénégal