

TABLE DES MATIÈRES

Dédicaces	i
Remerciements.....	ii
Table des matières	iv
Liste des abréviations et sigles	vi
Liste des figures	viii
Liste des tableaux	ix
Résumé.....	x
Abstract.....	xi
Introduction générale	1
Chapitre I : Synthèse bibliographique.....	4
I. La salinisation des terres	4
1) Généralités et définition.....	4
2) Les types de salinisation	4
3) Causes.....	5
a) La salinisation primaire.....	5
b) La salinisation secondaire	6
4) Les conséquences de la salinisation.....	6
a) Sur les végétaux.....	6
b) Sur les caractéristiques physicochimiques du sol.....	8
c) Sur les microorganismes du sol.....	8
d) Conséquences socio-économiques.....	9
5) Mécanisme d'adaptation des plantes au stress salin.....	10
a) Ajustement osmotique	10
b) Inclusion ou compartimentation	11
c) L'exclusion	11
6) Méthodes de lutte contre la salinisation.....	12
a) Les méthodes physiques.....	12
b) Les méthodes agrochimiques	14
c) Les méthodes biologiques.....	14
II. Les microorganismes symbiotiques et la tolérance au sel des plantes.....	15
1) Généralités sur les symbioses microbiennes végétales.....	15
a) La symbiose fixatrice d'azote.....	15
b) La symbiose mycorhizienne.....	16

2) Effet des champignons mycorhiziens à arbuscules sur la tolérance au stress salin chez les plantes	19
3) Effet des bactéries fixatrices d'azote sur la tolérance au stress salin chez les plantes	20
III. Généralités sur le <i>Melaleuca</i>	22
1) Classification botanique.....	22
2) Description du genre.....	22
3) Écologie.....	23
4) Usages.....	24
5) La tolérance au stress salin des <i>Melaleuca</i>	24
Chapitre II : Matériel et méthodes	26
I. Justification sur le choix et présentation du site de la plantation de <i>Melaleuca</i>	26
1) Justification sur le choix du site	26
2) Présentation du site de la plantation de <i>Melaleuca</i>	26
a) Localisation.....	26
b) Caractéristiques biophysiques	27
c) Activités socio-économiques.....	28
d) Géomorphologie	28
II. Matériel.....	29
III. Méthodes.....	29
1) Mise en place du dispositif expérimental.....	29
2) Mesure de la croissance des plantes de <i>Melaleuca leucadendron</i> (L.).....	31
3) Etude de la diversité floristique de la végétation herbacée	31
4) Impact de la plantation de <i>Melaleuca</i> sur les propriétés physicochimiques du sol	33
5) Analyse statistique.....	34
Chapitre III : Résultats et discussion.....	35
I. Résultats	35
1) Effet du précédent inoculum avec le <i>Rhizophagus Fasciculatus</i> et /ou <i>Frankia Ccl6</i> sur le taux de survie et la croissance des plantes de <i>Melaleuca leucadendron</i> (L.) en milieu salé	35
2) Effet de la plantation de <i>Melaleuca leucadendron</i> (L.) sur la végétation herbacée.....	37
3) Impact de la plantation de <i>Melaleuca leucadendron</i> (L.) sur les caractéristiques physicochimiques du sol.....	41
II. Discussion.....	43
Conclusion et perspectives	47
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	48
Annexe	60

LISTE DES ABRÉVIATIONS ET SIGLES

ADP	: Adénosine Diphosphate
ATP	: Adénosine Triphosphate
ATPase	: Adénosine Triphosphatase
°C	: Degré Celsius
CaCO₃	: Carbonate de calcium
CE	: Conductivité Electrique
CEC	: Capacité d'Echange Cationique
cm	: Centimètre
CMA	: Champignons Mycorhiziens Arbusculaires
CNRA	: Centre National de Recherches Agronomiques
CO₂	: Dioxyde de carbone
CSE	: Centre de Suivi Ecologique
Dh	: Diamètre houppier
dS	: Déci-siemens
<i>et al</i>	: <i>et alii</i>
FAO	: Food and Agriculture Organisation
FIRST	: Fond d'Impulsion de le Recherche Scientifique et Technique
ha	: Hectare
INP	: Institut National de Pédologie
IRD	: Institut de Recherche pour le Développement
ISRA	: Institut Sénégalais de Recherches Agricoles
LADA	: Land Degradation Assessment in Drylands
LCM	: Laboratoire Commun de Microbiologie
m	: Mètre
Mg	: Magnésium
Mha	: Million d'hectare
mM	: Millimolaire
N	: Azote
N₂	: Diazote

Na	: Sodium
NaCl	: Chlorure de sodium
PADERCA	: Projet d'Appui au Développement Rural en Casamance
PAPIL	: Projet d'Appui à la Petite irrigation Locale
pH	: Potentiel Hydrogène
Pi	: Phosphore
PPA	: Prépénétration Apparatus
PPase	: Pyrophosphatase
PROGERT du Bassin Arachidier	: Projet de gestion et de restauration des Terres dégradées
PSE	: Pourcentage en Sodium Echangeable
ROS	: Reactive oxygen species = espèces réactives de l'oxygène
SOS	: Salt Overly Sensitive
UCAD	: Université Cheikh Anta Diop de Dakar
µm	: Micromètre

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Mécanismes de tolérance des plantes au sel par la compartimentation et l'exclusion de Na ⁺ ; source : (Jabnourne, 2008).....	12
Figure 2: Les principaux types de morphologie mycorhizienne, représentés sur une coupe transversale de racine. (a) endomycorhizes à arbuscules ; (b) endomycorhizes à pelotons d'Orchidaceae ; (c) endomycorhizes à pelotons des Ericaceae et Hélianthèmes ; (d) ectendomycorhizes ; (e) ectomycorhizes © A. Gallien - Ac-Dijon (Modifié de M.-A. Selosse et F. Le Tacon) Source : (Sélosse, 2018).....	17
Figure 3: Les trois étapes de l'établissement de la symbiose mycorhizienne à arbuscules (Bonfante et Genre, 2010).....	19
Figure 4: Aspect morphologique de <i>M.leucadendron</i> (L.) A: arbres de <i>M. leucadendron</i> ; B: rameau de <i>M. leucadendron</i> avec ses organes reproductifs (source : Ndong, 2018).....	23
Figure 5 : localisation du village de Ndiémou	27
Figure 6: Evolution de la pluviométrie de la commune de Niakhar sur dix ans (2007-2017).28	
Figure 7: Dispositif expérimental.....	30
Figure 8 : croissance en hauteur et du diamètre au collet des plantes de <i>M. leucadendron</i> après deux ans de plantation selon les traitements.	36
Figure 9: croissance du diamètre du houppier des plantes de <i>M. leucadendron</i> (L.) après deux ans de plantation selon les traitements.	36

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: La classification des sols en fonction de la conductivité électrique (CE), le pourcentage de sodium échangeable (PSE), le pH et le rapport d'absorption du sodium (Choudhary et Kharche, 2018).....	5
Tableau 2: Echelle de pourcentages des différents indices d'abondance/dominance	33
Tableau 3 : Taux de survie des plants de <i>M. leucadendron</i> après deux ans de plantation	35
Tableau 4: Liste des espèces herbacées présentes SC: sous couvert et HC: hors couvert de <i>Melaleuca</i> (+ : présence ; - : absence)	37
Tableau 5 : Fréquence de présence des espèces sous couvert et hors couvert de <i>Melaleuca leucadenron</i> (L.).....	38
Tableau 6: Contribution spécifique présence (C.S.P) des espèces sous couvert et hors couvert de <i>Melaleuca leucadenron</i> (L.).....	40
Tableau 7: Variation de la diversité floristique sous couvert et hors couvert de <i>Melaleuca</i> ...	41
Tableau 8: impact de la plantation de <i>Melaleuca leucadenron</i> (L.) sur les propriétés physicochimiques du sol.....	56

RESUME

La salinisation est connue comme un facteur qui entraîne une destruction de la structure du sol, une perte considérable de sa fertilité et une réduction des rendements agricoles et de la biodiversité des écosystèmes. Ainsi pour réhabiliter et valoriser les terres salées, plusieurs stratégies ont été préconisées à savoir les méthodes mécaniques, agrochimiques et biologiques. Cette dernière méthode qui s'avère moins couteuse, plus durable et respectueuse de l'environnement est la plus utilisée et nécessite l'utilisation des espèces pionnières tolérantes au sel. Parmi ces espèces, le genre *Melaleuca*, appartenant à la famille des *Myrtaceae*, est largement utilisés dans ces programmes. Il a été démontré que l'association des plantes pionnières avec les microorganismes symbiotiques du sol améliore leur tolérance au sel. L'objectif de notre étude est de contribuer à la réhabilitation et à la valorisation des terres dégradées par le sel au Sénégal. En effet, après avoir enregistré une forte mortalité des plantes de *casuarina sp* inoculées avec le *Rhizophagus fasciculatus* et/ou la bactérie *Frankia* et transplantées en septembre 2016 sur le site d'étude, des plantes de *Melaleuca leucadendron* (L.) non inoculées ont été transférées sur le même site (même dispositif) en août 2017. L'objectif de cette expérimentation est de caractériser la plantation de *Melaleuca* sur les terres salées de Ndiémou (Fatick), d'étudier l'effet du précédent inoculum (*Rhizophagus fasciculatus* et/ou la bactérie *Frankia*) sur la tolérance au sel des plantes *Melaleuca leucadendron* (L.) et l'effet de la plantation sur la diversité floristique et les caractéristiques physico-chimiques des sols salins. Pour étudier l'effet de la précédente inoculation sur la tolérance au sel des plantes, le taux de survie et la croissance des plantes ont été évalué. Les résultats obtenus ont montré que 58,40 % des plantes ont survécu deux ans après plantation et que le précédent inoculum n'a pas d'effet significatif sur le taux de survie et la croissance des plantes. Ce taux de survie peut être amélioré jusqu'à 60,16% avec l'utilisation des champignons mycorhiziens arbusculaires (CMA). Il en ressort aussi de ces résultats que l'évaluation de la diversité de la végétation herbacée a révélé des indices de diversité plus importants dans le sous couvert de *Melaleuca* comparés aux parcelles hors couvert. De plus, excepté le taux de potassium qui est plus important dans le sous couvert, la plantation n'a aucun effet significatif sur les paramètres physico-chimiques du sol après deux ans de plantation. Ainsi, nos résultats suggèrent que *Melaleuca leucadendron* (L.) pourrait être utilisé dans les programmes de valorisation agrosylvopastorale des terres salées au Sénégal.

Mots clés : Salinisation, Réhabilitation, *Melaleuca leucadendron*, *Rhizophagus fasciculatus*, *Frankia CcI6*

ABSTRACT

Salinization is known to be a factor that leads to the destruction of the soil structure, a considerable loss of its fertility and a reduction in agricultural yields and the biodiversity of ecosystems. Thus, to rehabilitate and enhance salty land, several strategies have been recommended, namely mechanical, agrochemical and biological methods. This latter method, which is less expensive, more sustainable and respectful of the environment, is the most used and requires the use of pioneer salt-tolerant species. Among these species, the genus *Melaleuca*, belonging to the family of Myrtaceae, is widely used in these programs. The association of pioneer plants with symbiotic soil microorganisms improved salt tolerance. Our study aim is to contribute to the rehabilitation of land degraded by salt in Senegal. Indeed, after recording a high mortality of *casuarina sp* plants inoculated with *Rhizophagus fasciculatus* and / or *Frankia CcI6* bacteria and transplanted in September 2016 at the study site, uninoculated plants of *Melaleuca leucadendron* (L.) were transferred to the same site (same device) in August 2017. The objective of this experiment is to i) characterize the plantation of *Melaleuca* on the salty lands of Ndiémou (Fatick) ii) to study the effect of the previous inoculum (*Rhizophagus fasciculatus* and /or the bacteria *Frankia CcI6*) on the salt tolerance of *Melaleuca leucadendron* (L.) plants and iii) to evaluate the effect of planting on plant diversity and physicochemical characteristics of saline soils. To study the effect of the previous inoculation on the salt tolerance of plants, the survival rate and growth of the plants were evaluated. The results obtained showed that 58.40% of the plants survived two years after planting and that the previous inoculum did not have a significant effect on the survival rate and the growth of the plants. This survival rate can be improved up to 60.16% with the use of arbuscular mycorrhizal fungi (MACs). These results also show that the evaluation of the diversity of the herbaceous vegetation revealed greater indices of diversity under the cover of *Melaleuca* compared to the out of cover plots. In addition, except for the potassium level which is higher in the undercover, planting has no significant effect on the physico-chemical parameters of the soil after two years of plantation. Thus, our results suggest that *Melaleuca leucadendron* (L.) could be used in agrosilvopastoral enhancement programs of salt lands in Senegal.

Key words: Salinization, Rehabilitaion, *Melaleuca leucadendron*, *Rhizophagus fasciculatus*, *Frankia CcI6*.

Introduction générale

Dans les régions arides et semi arides, la salinisation des terres reste l'un des principaux types de stress environnementaux qui affecte la croissance des plantes (Choudhary et Kharche, 2018). La salinité est le terme utilisé pour décrire l'état où les sels solubles s'accumulent dans la solution (sol ou eau) à un niveau qui a un impact négatif sur la croissance et le développement des plantes cultivées (Srivastava *et al.*, 2019).

La salinisation provoque une dégradation des propriétés biologiques, chimiques et physiques des sols (Fall, 2016). Elle entraîne la disparition du couvert végétal naturel remplacé parfois par d'immenses étendues de zones salées appelées tannes (Ndour, 2006), la diminution de leur fertilité et la réduction des rendements des cultures (Mermoud, 2006) qui peut impacter considérablement l'économie et provoquer une insécurité alimentaire.

La salinisation des terres résulte de causes naturelles dont l'intrusion des eaux marines lors des marées hautes, la remontée capillaire des eaux de nappes phréatiques salées, l'érosion des roches (Faye *et al.*, 2019) mais aussi d'activités anthropiques dont le mauvais drainage des sols dans les périmètres irrigués et fertilisés par les engrais chimiques. En plus des causes anthropiques viennent s'ajouter le phénomène des changements climatiques tels que la hausse des températures qui favorise les fortes évaporations, la faiblesse des précipitations ; qui sont très favorables à l'ascension et à la précipitation des sels dans la zone racinaire et l'horizon superficiel (Hachicha, 2007).

Selon la FAO (2006), la salinisation affecte au moins 400 millions d'ha et en menace gravement une surface équivalente (Legros, 2009). Près de 2% de la surface totale affectée se trouve en Afrique soit près de 40 Mha (FAO, 2006). Au Sénégal, la salinisation des terres ne cesse de prendre de l'ampleur (CSE/LADA, 2003). En 2009, la superficie des terres affectées était estimée à près de 1 700 000 ha (LADA, 2009). 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 administrative de Fatick (Fall, 2016).

Face à cette dégradation des terres qui s'accompagne d'une baisse de la productivité agricole, et d'une augmentation de la croissance démographique, l'accès aux terres agricoles est devenu problématique. De ce fait, il est nécessaire de restaurer et valoriser les espaces affectés par la salinité.

Ainsi, l'état et les collectivités locales ont entrepris plusieurs formes de lutte à savoir les méthodes mécaniques (confection de diguettes et digues anti-sel) qui coûtent très chères, les méthodes agro-chimiques par amendement de matières organiques et chimiques (épandage de coque d'arachide, de fumier, d'ordures ménagères, l'acide sulfurique, le gypse) pouvant avoir des impacts sur l'environnement et les méthodes biologiques respectueuses de l'environnement (Sayed, 2011) par le reboisement avec des espèces forestières adaptées à la salinité, avec l'appui de certains bailleurs de fonds et des institutions de recherches comme l'ISRA et l'IRD.

En effet, la méthode biologique de valorisation des terres dégradées via l'utilisation de plantes tolérantes au sel a été recommandée comme une approche intégrée de gestion appropriée des terres salées (Qadir et Oster, 2002 ; Singh, 2009). Certaines espèces sont non seulement capables de résister à certaines contraintes du milieu telles que la sécheresse et la salinité mais aussi de fixer l'azote et d'augmenter la disponibilité du phosphore (Diagne, 2011). Au Sénégal, beaucoup d'espèces appartenant aux genres *Eucalyptus*, *Melaleuca*, *Acacia*, *Tamarix* et *Atriplex* sont testées par la recherche. Elles sont plantées dans les *tannes* enherbées et dans les *tannes* arbustives en début d'hivernage (Ndour, 2006). Les études de ce même auteur ont montré que les espèces du genre *Melaleuca* sont dotées d'une plus grande capacité de résistance dans les milieux salés.

Plusieurs études ont montré que l'association symbiotique des plantes pionnières avec des bactéries fixatrices d'azote et des champignons mycorhiziens à arbuscules renforce leur capacité de mieux s'établir sur les sols salés (Diagne, 2011 ; Kumar et Verma, 2018). Cette approche fournirait un moyen rentable et respectueux de l'environnement d'atténuation du stress salin lié à la promotion de la croissance des plantes, ce qui pourrait à son tour conduire à une agriculture durable dans des conditions climatiques changeantes (Chakraborty *et al.*, 2019).

La présente étude s'inscrit dans le cadre de contribuer à la valorisation agrosylvopastorale d'écosystèmes dégradés par le sel. Il a pour objectif principal de caractériser une plantation de *Melaleuca leucadendron* (L.) de 2017 sur sol salé précédemment inoculé avec la souche de *Frankia Cc16* et /ou le champignon mycorhizien à arbuscule (CMA) *Rhizophagus fasciculatus* dans le terroir de Ndiémou (Fatick).

Ce mémoire sera structuré comme suit :

Une introduction qui va parler du contexte de l'étude et l'urgence de la réhabilitation des terres salées.

Le chapitre I sera consacré à la revue bibliographique faisant l'état des connaissances sur la salinisation des terres, les microorganismes symbiotiques et la tolérance au sel des plantes et enfin les généralités sur le *Melaleuca*.

Le chapitre II portera sur la présentation du site d'étude, le matériel et la méthodologie adoptée.

Le chapitre III sera consacré aux résultats et discussion et enfin la conclusion et les perspectives de l'étude

Chapitre I : Synthèse bibliographique

I. La salinisation des terres

1) Généralités et définition

La salinisation est l'accumulation de sels tels que le sodium, le potassium, le magnésium, le calcium, les chlorures, les sulfates, les carbonates et les bicarbonates dans le sol (FAO, 2015). Elle devient problématique dans la mesure où elle entraîne un accroissement de la pression osmotique qui rend l'eau plus difficilement mobilisable par les plantes, une toxicité de certains ions pour les végétaux (Cl^- et Na^+) et une dégradation du sol (modification de l'état structurale, diminution de la conductivité hydraulique etc.) (FAO, 2006). Un sol peut être reconnu comme affecté par le sel lorsque certains changements apparaissent à la surface du sol, comme l'apparition d'une croûte de sel blanche sur un terrain nu et le développement de taches salines dans le sol (Srivastava *et al.*, 2019). Elle est mesurée par la conductivité électrique (CE) de l'eau du sol, qui est une évaluation de la concentration en sel total dissous (Hillel, 2005). Selon Chakraborty *et al.*, (2019) un sol est salin lorsque sa conductivité électrique est supérieure à 4 déci-siemens par mètre (dS/m) à 25°C correspondant à 40 mM de NaCl soit 2,4 g/l (Chakraborty *et al.*, 2019).

2) Les types de salinisation

Selon la concentration en sels et le pourcentage de sodium échangeable, certains auteurs ont catégorisé les sols en trois types (salin, sodique ou salin-sodique) (Chen *et al.*, 2017 ; Choudhary et Kharche, 2018).

- les sols salins qui ont un pourcentage de sodium échangeable autour de 15, un rapport d'adsorption de sodium inférieur à 13 (à 25 °C), une conductivité électrique supérieure à 4 dS/m et un pH inférieur à 8,5.
- les sols sodiques qui ont une conductivité électrique généralement inférieure à 4 dS/m, le sodium échangeable est supérieur à 15, le pH de ces sols se situe entre 8,5 et 10,5. Le cation le plus répandu d'un sol sodique est le sodium et le bicarbonate est le plus complémentaire.
- les sols salin-sodiques qui présentent un pourcentage de sodium échangeable supérieur à 15, un rapport d'adsorption de sodium supérieur à 13 (à 25 °C), une conductivité électrique supérieure à 4 dS/m et un pH inférieur à 8,5.

Par conséquent, un sol avec des sels solubles excessifs est reconnu comme sol salin ; à haute teneur en sodium échangeable comme sodique et avec excès de sels et de sodium échangeable

en tant que sol salin-sodique (Srivastava *et al.*, 2019). Le tableau suivant indique la classification des sols en fonction de la conductivité électrique, le pourcentage de sodium échangeable, le pH et le rapport d'absorption du sodium (Choudhary et Kharche, 2018).

Tableau 1: la classification des sols en fonction de la conductivité électrique (CE), le pourcentage de sodium échangeable (PSE), le pH et le rapport d'absorption du sodium (Choudhary et Kharche, 2018)

Types de sol	CE (dS/m) à 25°C	pH	PSE	Rapport d'absorption du Na
Salin	> 4	< 8	< 15	< 13
Sodique	< 4	> 8,5	>15	>13
Salin-sodique	>4	< 8,5	>15	>13

3) Causes

La dynamique des terres salées est sous l'influence de plusieurs facteurs. Selon leur source de provenance, les causes de la salinisation des terres sont classées en deux groupes ; celles qui ont une origine naturelle qualifiées de « primaires » et celles d'origine anthropique dites « secondaires » (Bensidhoum et Nabti, 2019). Selon la FAO, près de 80% des terres salinisées ont une origine primaire et 20% sont secondaire (FAO, 2006).

a) La salinisation primaire

La salinisation primaire ou naturelle résulte de l'accumulation des sels dans le sol à travers un long processus naturel de dégradation des roches salines et des apports éoliens des sels des mers et des océans (Mermoud, 2006). Elle implique l'accumulation de sels par des processus naturels en raison des teneurs en sels élevées dans les matériaux d'origine, les eaux souterraines, ou l'accumulation à long terme des sels contenus dans les précipitations (FAO, 2015). Elle peut être induite par les inondations périodiques par de l'eau de mauvaise qualité ou la remontée d'une nappe phréatique salée près de la zone racinaire (Mermoud, 2006).

La migration et le dépôt des sels dissous dans l'eau dépendent des caractéristiques du milieu naturel et des précipitations (Attabi et taiba, 2019). Les sels de l'océan constitués principalement par le chlorure de sodium sont amenés par le vent et déposés par la pluie au niveau continental (Noomene, 2011). Dans les régions arides et semis arides, le lessivage et le transport en profondeur des sels dissous n'existent plus et l'évapotranspiration importante favorise la concentration des sels dans le sol (Jvarlin, 2012).

b) La salinisation secondaire

La salinisation secondaire est le résultat des activités humaines qui modifient l'équilibre hydrologique du sol entre l'eau appliquée (irrigation ou de pluie) et de l'eau utilisée par les cultures (transpiration) (Boukourt, 2016). Elle est causée par diverses activités anthropiques et les plus fréquentes sont :

- Le remplacement de la végétation pérenne avec des cultures annuelles : les arbres absorbent plus d'eau que les plantes cultivées de ce fait, si la nappe est salée et peu profonde le déboisement peut provoquer la migration des ions sels dans les horizons supérieurs et inférieurs du sol (Goyal *et al.*, 2019). Le réchauffement climatique pourrait aggraver le problème et rendre beaucoup plus floue la frontière entre la salinisation d'origine naturelle et d'origine humaine (Jvarlin, 2012).

- Le défrichage des terres : contrairement à la végétation primitive, les cultures laissent le sol nu durant certaines périodes de l'année et les pluies survenant à ces moments ne seront pas absorbées et provoqueront le même phénomène de diffusion du sel vers la surface.

- L'application d'engrais chimiques avec un manque de précipitations ou de drainage appropriés pour lessiver les sels supplémentaires peut également entraîner la salinisation du sol (Srivastava *et al.*, 2019).

- l'irrigation avec des eaux de mauvaise qualité : si l'eau d'irrigation appliquée contient des quantités relativement significatives d'ions sodium (Na^+) par rapport aux quantités présentes d'ions magnésium (Mg^{2+}) et d'ions calcium (Ca^{2+}), et en particulier si l'ion bicarbonate (HCO_3^-) est aussi présent ; les ions sodium peuvent alors saturer la majeure partie des sites d'échanges colloïdaux entraînant la formation de sols sodiques (Choudhary et Kharche, 2018).

4) Les conséquences de la salinisation

a) Sur les végétaux

Les effets de la salinité sur les plantes sont complexes et ses conséquences incluent le déficit hydrique, la toxicité par certains ions comme Na^+ , la déficience et le déséquilibre nutritionnel (Bensidhoum et Nabti, 2019).

- Le déficit hydrique

La quantité d'eau utilisée par le végétal dépend de la différence de potentiel hydrique entre la solution du sol et le suc cellulaire (Fall, 2016). Ainsi, la salinité de la solution du sol diminue l'approvisionnement en eau par absorption provoquant ainsi un stress hydrique chez la plante

(Parida et Das, 2005). Selon Song *et al.*, (2005), plus la solution du sol est salée, plus la pression osmotique est élevée et plus il est difficile pour les racines d'extraire l'eau de la réserve du sol (Song *et al.*, 2005). L'augmentation de la pression osmotique résultante de l'excès de sels entraîne une élévation d'énergie que la plante fournit au sol, ce qui conduit à une intensification de la respiration et une réduction de la croissance des plantes (Lahouel, 2014).

- **La toxicité par les ions**

Lorsque la plante se développe en présence de Na^+ , l'accumulation de cet ion dans le cytoplasme au-delà de certain seuil devient toxique (Evelin *et al.*, 2009) même si ce seuil n'est pas clairement déterminé (Jabnoue, 2008). Munns et Tester (2008) affirment que le Na^+ est considéré comme plus toxique que le Cl^- , pour la plupart des espèces végétales, car une fois que le Na^+ est absorbé par les racines, il peut être rapidement transféré aux pousses via le xylème où il s'accumule à mesure que l'eau s'évapore (Munns et Tester, 2008). De plus, la recirculation de Na^+ vers les racines est limitée, ce qui suggère que le transport de Na^+ est quelque peu unidirectionnel entraînant ainsi une accumulation dans les pousses et le feuillage (Tester et Davenport 2003).

Plusieurs auteurs ont rapporté que les concentrations élevées en ions Na^+ et Cl^- dans le cytoplasme des cellules entraînent une interférence avec l'intégrité de la membrane plasmique, la destruction des organites et l'inhibition des activités photosynthétiques, la synthèse des protéines, des structures enzymatiques et de la respiration (Feng *et al.*, 2002 ; Evelin *et al.*, 2009) ; ce qui aboutit à des dysfonctionnements cellulaires (Jabnoue, 2008).

- **La déficience et le déséquilibre nutritionnel**

La solution du sol, contenant une abondance d'ions Na^+ et Cl^- , présente un problème d'absorption difficile pour les ions vitaux tels que N, Mg^{2+} , Ca^{2+} , P, K^+ chez la plante (Okon, 2019) et une compétition pour les ressources nutritives (Chodak *et al.*, 2015). Certains de ces ions comme le K^+ , Ca^{2+} , NO_3^- et Mg^{2+} entrent en compétition avec le sodium et le Cl^- pour les mêmes sites de fixation apoplasmiques (Karimi *et al.*, 2005). Cette compétition conduit à un déséquilibre ionique, en particulier, à un rapport Na^+ / K^+ perturbé (Sawers *et al.*, 2017) qui entraîne à son tour une réduction de l'activité de transport d'électrons photosynthétiques, en particulier l'activité PSII (Photosystème II) dans les chloroplastes (Chatterjee *et al.*, 2018). Des études similaires ont été obtenues par Akram *et al.*, (2007) qui ont montré que le stress salin induit une mauvaise croissance des plantes de tournesol en raison des relations antagonistes des ions Na^+ et Cl^- avec les nutriments essentiels tels que Ca^{2+} , K^+ ou N (Akram *et al.*, 2007).

b) Sur les caractéristiques physicochimiques du sol

Des teneurs élevées en sels conduisent à une dégradation des propriétés physicochimiques du sol (Legros, 2009). Sur les propriétés chimiques du sol, la salinité affecte le pH, la capacité d'échange cationique (CEC), le pourcentage de sodium échangeable (PSE), le carbone organique et modifie le potentiel osmotique et matriciel du sol (Wang *et al.*, 2014). En effet, une forte présence de sel provoque une compétition entre les ions Na^+ et H^+ entraînant une alcalinisation du milieu par une augmentation du pH (Fall, 2016). De plus, elle induit une augmentation de la concentration des cations échangeables tels que le Na^+ provoquant ainsi une modification de la capacité d'échange cationique et du pourcentage de sodium échangeable (Choudhary et Kharche, 2018). Ces transformations chimiques auront des répercussions notables au niveau des propriétés physiques du sol.

En ce qui concerne les propriétés physiques, selon la quantité de sodium échangeable, le sel affecte différemment la structure du sol (Choudhary et Kharche, 2018) :

- au niveau des sols sodiques où une forte quantité de sodium est présente sur les sites d'échanges, la salinité entraîne la dispersion des colloïdes responsable de la déstructuration du sol et de leur coloration en brun noir (Calvet, 2003). La salinité convertit le sol en une substance semblable à du ciment dur causant une faible infiltration avec une conductivité hydraulique réduite et le développement de croûtes de surface (Srivastava *et al.*, 2019). Du point de vue agricole, cela se traduit d'une part par la prise en masse du sol qui devient très compact, dur, difficile à labourer, et d'autre part, par des difficultés de germination et d'enracinement des plantes (Ngom, 2016a).

- au niveau des sols salins, en raison de faibles quantités d'ions Na^+ sur les sites d'échanges, les fines particules du sol seront liées en agrégats par le processus de floculation (Srivastava *et al.*, 2019). Ces sols à l'état floculé ont une perméabilité considérée comme égale ou supérieure à celle des sols normaux et sont bénéfiques pour l'aération et la croissance des racines des plantes (Choudhary et Kharche, 2018).

c) Sur les microorganismes du sol

La salinité affecte négativement la communauté microbienne en inhibant leurs activités et limitant leur croissance (Goyal *et al.*, 2019). Les sels dissous peuvent affecter directement les organismes du sol par la toxicité des fortes concentrations d'ions tels que le sodium ou le chlorure, ou par l'effet non spécifique des solutés sur le potentiel osmotique et, par conséquent,

sur le potentiel hydrique (Cacciari *et al.*, 2013). En effet, chez les micro-organismes, plus le potentiel hydrique du sol est faible (plus négatif), plus il est difficile pour eux d'absorber l'eau du sol qui agira en tant que solvant des réactants facilitant ainsi la première phase de contact enzyme/substrat (Lozach, 2001). De ce fait, pour prévenir le stress hydrique et les fluctuations du potentiel hydrique en condition de stress salin, certaines bactéries produisent des exopolysaccharides (Sandhya *et al.*, 2009).

En outre, le sel affecte la structure de la membrane des microorganismes et induit une perte de la diversité microbienne du sol (Chodak *et al.*, 2015). Toutefois, Srivastava *et al.*, (2013) ont rapporté que la salinité entraîne une perturbation de l'intégrité de la membrane plasmique chez les bactéries conduisant à une plasmolyse des cellules et à une perte de solutés essentiels (Srivastava *et al.*, 2013). Ceci induit un déséquilibre nutritionnel dû à l'altération du transport des autres cations et à l'accumulation des ions Na^+ et Cl^- aboutissant à une lyse cellulaire (Singh, 2016).

Etant donné que les microorganismes jouent un rôle très important dans la décomposition de la matière organique, une baisse de leur population va entraîner une réduction de la décomposition de celle-ci aboutissant à une baisse des éléments nutritifs disponibles dans le sol (Iwai *et al.*, 2012).

d) Conséquences socio-économiques

La salinisation du sol est l'un des principaux facteurs qui affectent négativement à la fois la plante et son environnement, conduisant à une production agricole réduite (Chatterjee *et al.*, 2018). En effet, Azevedo Neto *et al.*, (2006) ont rapporté que le rendement moyen des cultures est réduit de 50 % dans les sols agricoles salins (Azevedo Neto *et al.*, 2006) ; ce qui constitue une menace pour la sécurité alimentaire (Qadir *et al.*, 2014).

De plus, l'expansion progressive de ce phénomène de salinisation a conduit à une perte de terres agricoles productives qui va amplifier la volatilité des prix alimentaires et potentiellement reléguer des millions de personnes dans la pauvreté (FAO, 2015). Cette perte de terres productives fait que la plupart des agriculteurs touchés complètent leur faible revenu agricole par des activités économiques non agricoles (Zekri *et al.*, 2010) et certains agriculteurs des zones gravement touchées se déplacent vers les villes voisines pour le travail (Qadir *et al.*, 2014). Ces derniers révèlent qu'en plus de ces conséquences, la salinisation a entraîné une augmentation de 20-40 % et 15-50 % respectivement des problèmes de santé humaine et animale.

5) Mécanisme d'adaptation des plantes au stress salin

Le mécanisme d'adaptation des végétaux à la salinité résulte des processus qui permettent au végétal d'absorber l'eau et les sels minéraux à partir de substrats à faibles potentiels hydriques mais aussi de vivre en acceptant la présence importante du sodium dans ses tissus (Lahouel, 2014). Elle dépend principalement de la capacité des racines à absorber sélectivement les ions Na^+ et le Cl^- et à continuer à absorber les éléments essentiels, en particulier le K^+ et le NO_3^- (Ashraf *et al.*, 2004). Selon le degré de tolérance à la salinité, les plantes sont divisées en halophytes qui sont des plantes pouvant tolérer des niveaux élevés de salinité et terminer leur cycle de vie à des concentrations de sels supérieures à 20 dS / m (Flowers et Colmer, 2008) et en glycophytes qui sont sensibles au sel ; leur croissance est fortement inhibée en présence de concentrations de sels entre 100 et 200 mM (Zhu, 2007).

En réponse au stress salin, les plantes développent des stratégies d'adaptation communes qui font appel à des modifications d'ordre physique (réduction de l'hydratation cellulaire, réduction du volume cellulaire, modification du module d'élasticité des parois cellulaires et augmentation de la conductivité hydraulique) et d'ordre chimique tels que l'ajustement osmotique, l'exclusion et l'inclusion (Ikram et Hayat, 2018).

a) Ajustement osmotique

En présence de teneurs élevées en sels, la transpiration serait plus importante que l'absorption, les plantes doivent donc trouver un moyen d'ajuster leur potentiel hydrique de manière à maintenir un bilan hydrique à des niveaux compatibles avec le fonctionnement de leur métabolisme (anonyme 2009). Il est réalisé grâce à une accumulation de composés osmorégulateurs qui peuvent être des ions comme le K^+ ou des composés organiques tels les sucres solubles (fructose, glucose, tréhalose, raffinose, etc.) et certains aminoacides (proline, glycine bêtaïne, β -alaninebêtaïne, prolinebêtaïne) (Boukourt, 2016). Le rôle principal de ces composés consiste à maintenir un faible potentiel hydrique à l'intérieur des cellules afin de générer une force de succion pour l'absorption de l'eau permettant ainsi le maintien du potentiel de turgescence (Hanana *et al.*, 2011). Ils agissent également comme des osmoprotecteurs aux propriétés antioxydantes (Dubey et Verma, 2019). En effet, Carter *et al.*, (2006) ont suggéré que l'accumulation de méthyl proline induite par le sel chez le *Melaleuca cuticularis* est suffisante pour fournir un équilibre osmotique dans le cytoplasme (Carter *et al.*, 2006). En outre, en analysant l'accumulation de dérivés de la proline dans les feuilles de 25 espèces de *Melaleuca*, Naidu *et al.* (2000) ont montré une relation possible entre la tolérance au sel et les différents types de dérivés de proline accumulés (Naidu *et al.*, 2000). Ce phénomène permet le

maintien de nombreuses fonctions physiologiques (photosynthèse, transpiration, croissance...) et peut intervenir à tous les stades du développement du végétal (Boukourt, 2016).

b) Inclusion ou compartimentation

La compartimentation est un mécanisme qui contribue à limiter l'accumulation toxique de Na^+ dans le cytosol (Jabnour, 2008). Elle empêche la déshydratation des cellules permettant ainsi d'augmenter l'osmolarité du cytoplasme en séquestrant l'excès de Na^+ dans la vacuole pour protéger le cytoplasme des niveaux toxiques d'ions en condition de stress salin (Evelin *et al.*, 2009). L'influx des ions Na^+ dans la vacuole se fait par le biais des échangeurs vacuolaires Na^+/H^+ et le gradient de H^+ généré par les protéines H^+/ATPase et H^+/PPase (pyrophosphatase) (Jabnour, 2008). Ce mécanisme fait aussi intervenir d'autres organites comme les plastes et les mitochondries (Djighaly, 2019). La compartimentation se trouve chez la plupart des agrumes et des études ont montré que chez les Citrus la variation génétique de la tolérance à la salinité est corrélée avec l'accumulation des ions chlorures et sodium dans la vacuole (Yahmed, 2013).

c) L'exclusion

Ce mécanisme consiste à empêcher le sel de rester dans la plante en limitant son entrée ou en l'excrétant par les racines ou encore par transpiration foliaire (Munns, 2005). Il permet à la plante d'exclure 98% du contenu en sels (Na^+) à travers ses racines (Ngom, 2016a). L'efflux de Na^+ hors des cellules végétales est réalisé par des antiports sodium / protons SOS1, qui sont situés sur la membrane plasmique (Bensidhoum et Nabti, 2019). L'exclusion permet à la plante de ne pas accumuler à des concentrations pouvant être toxiques les ions tels que Na^+ et Cl^- (Xiong et Zhu, 2002). Munns (2005) indique que le mécanisme d'exclusion de sel est caractéristique des glycophytes. Ces plantes, sensibles à la salinité, contiennent ainsi peu d'ions Na^+ dans les feuilles du au mécanisme d'exclusion qui provoque une accumulation de Na^+ dans les racines, évitant une translocation excessive aux tiges ; mais, il peut être aussi lié à une mobilité élevée de cet élément dans le phloème (Boukourt, 2016). Ce mécanisme est aussi trouvé chez les espèces du genre *Melaleuca* comme le *M. cuticularis* ou *M. thyoides* qui peuvent s'adapter en condition saline par exclusion des ions Na^+ respectivement à travers les feuilles (Carter *et al.*, 2006) et les racines (Aini, 2012).

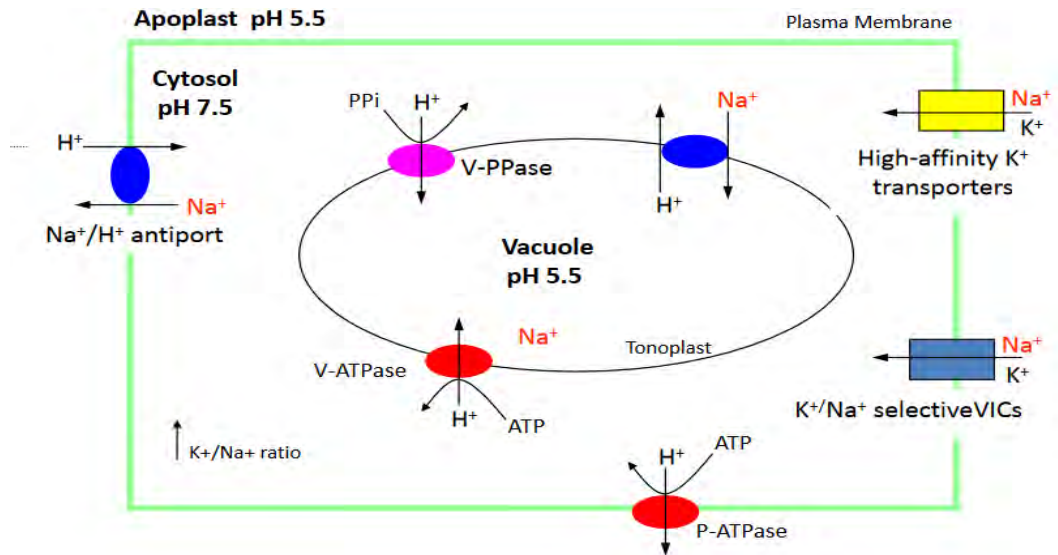


Figure 1: Mécanismes de tolérance des plantes au sel par la compartimentation et l'exclusion de Na^+ ; source : (Jabnourne, 2008)

6) Méthodes de lutte contre la salinisation

Le phénomène de salinisation des terres a pris des allures d'une véritable catastrophe écologique par une forte extension des espaces dénudés ou «tannes vives», sursalés, hyper-acidifiés et impropres à la culture (Anonyme, 2012). Cela se traduit par une diminution considérable des surfaces de terres arables. Selon la FAO, cette perte est estimée de 0,45 à 0,25 ha par habitant (FAO, 2015). Or, les estimations de la demande alimentaire mondiale sur la base des prévisions démographiques et des changements alimentaires attendus indiquent que la production en 2050 devra augmenter de 40 à 70 % par rapport à celle de 2010 (FAO, 2015). Compte tenu de cette nécessité de fournir davantage de denrées alimentaires, d'aliments pour animaux et de fibres à une population en expansion, et peu de nouvelles terres productives disponibles, il est nécessaire de restaurer et d'améliorer la productivité des terres affectées par le sel (Qadir et Oster, 2004). Ainsi, les méthodes de lutte principalement utilisées sont des méthodes physiques, agrochimiques et biologiques.

a) Les méthodes physiques

Pour lutter contre la salinisation des terres diverses méthodes physiques peuvent être utilisées telles que les aménagements hydro-agricoles (la construction de barrage, de digues, de diguettes et les déversoirs), le drainage, la lixiviation, l'irrigation, le biomimétisme, etc.

- **Les aménagements hydro-agricoles :** ont pour rôle de freiner le processus d'envahissement des terres cultivables par le sel et de retenir de l'eau douce favorisant ainsi le développement des activités agricoles (Koly, 2014). De nombreux projets tels que le PAPIL, le PADERCA, le PROGERT etc. s'intéressent à la réalisation de ces ouvrages hydro-agricoles pour la

récupération des terres arables. Par exemple dans la région de Fatick, il a été révélé qu'en 2013 la réalisation de plusieurs digues anti-sel et de méthodes de régulation par le Projet d'appui à la petite irrigation locale (PAPIL) a permis de récupérer plus de 2.000 hectares, sur une surface totale de 171724 hectares (Anonyme, 2013). Malgré ces résultats positifs, ces ouvrages sont souvent très coûteux et nécessitent également beaucoup d'entretiens.

- **Le drainage**: est l'une des méthodes les plus adaptées pour lutter contre la salinité du fait de sa capacité à limiter les remontées capillaires, à créer des flux souterrains permettant d'évacuer les sels en excès hors d'une parcelle mais aussi à couper les flux souterrains d'eau chargée en sels d'une parcelle à une autre (Lacharme, 2001). Choudhary et Kharche, (2018) révèlent qu'un drainage efficace avec des lits larges et surélevés agit comme les diguettes ; il permet une réduction de l'érosion, contribue à la conservation de l'humidité du sol et à l'augmentation des rendements (Choudhary et Kharche, 2018).

Cette méthode qui peut réduire la salinité du sol jusqu'à 50% s'est avérée techniquement viable, économiquement faisable et socialement acceptable par les agriculteurs (Raju *et al.*, 2016).

- **La lixiviation**: est une méthode qui oblige à déplacer les sels de la couche supérieure du sol (45–60 cm) du haut vers le bas et qui nécessite une eau de bonne qualité avec une faible concentration d'électrolytes (Shankar et Evelin, 2019). Ces électrolytes s'infiltrent à travers le profil du sol pour faciliter la dissolution des sels et leur mouvement vers le bas et empêchera l'accumulation d'excès de sels dans la zone racinaire (Shankar et Evelin, 2019). L'efficacité de cette méthode varie également avec la texture du sol. Elle sera plus dans les sols à texture grossière que dans les sols à texture fine (Choudhary et Kharche, 2018).

- **L'irrigation** : consiste en un apport artificiel d'eau douce sur des terres à des fins agricoles. Une irrigation fréquente maintient le niveau d'humidité du sol, empêchant ainsi la concentration de sels et minimisant dans une certaine mesure ses effets néfastes sur les plantes (Chen *et al.*, 2015). En effet, la riziculture irriguée, moyennant certaines précautions, est la première méthode de lutte contre la salinité car les apports d'eau importants de cette culture permettent de nettoyer les excès de sels présents dans le sol (Lacharme, 2001). La submersion et les activités biologiques des racines de riz augmentent la pression partielle de CO₂ qui augmente à son tour la solubilité du CaCO₃ natif grâce à sa conversion en calcium soluble (HCO₃)₂. Ce dernier abaisse le pourcentage de sodium échangeable en remplaçant le Na du complexe d'échange de sol entraînant une diminution de la salinité (Choudhary et Kharche, 2018).

- **Le biomimétisme** : C'est une nouvelle technique qui tente de mimer l'action capillaire des plantes vasculaires pour permettre la récolte de sel efflorescent à la surface du sol (Swallow et

O'Sullivan, 2019). D'après Shankar et Evelin (2019), en utilisant cette technique pendant 30 jours, les chercheurs ont pu réduire la conductivité électrique (CE) du sol, éliminer 90% des sels ajoutés tout en utilisant proportionnellement moins d'eau que les techniques traditionnelles de lavage du sol (Shankar et Evelin, 2019). Cette méthode est au stade naissant et doit encore être testée pour être utilisée comme un outil efficace de dessalement pour réduire la salinité du sol (Swallow et O'Sullivan, 2019).

b) Les méthodes agrochimiques

Elle consiste à utiliser des amendements de matières organiques et chimiques qui visent à augmenter le potentiel organique du sol en vue de réduire l'évaporation et d'améliorer sa fertilité (Devi *et al.*, 2015). Les engrais verts, les résidus de cultures et le fumier sont les amendements organiques potentiellement utilisés (Choudhary et Kharche, 2018). Plusieurs études ont montré qu'ils augmentent la capacité d'échange cationique, la disponibilité des nutriments et la porosité pour l'aération et l'absorption d'humidité du sol et améliorent les micro-organismes mais aussi diminuent la conductivité électrique et le pH du sol (Wang *et al.*, 2014 ; Fall, 2016). Par conséquent, ils réduisent la salinité et améliorent également la végétation dans les zones salines. Les travaux de Fall, (2016) ont montré que l'application de coques d'arachides de la variété 73-33 sur les plantes de *Senegalia senegal*, *Vachellia seyal* et *Prosopis juliflora* sur sols salés améliore les propriétés chimiques et biologiques du sol et la croissance des plantes. Tejada *et al.*, (2006) ont signalé qu'après un an de traitement du sol salin avec des déchets organiques, il y avait une croissance de végétation spontanée, et après une période de 5 ans, 80% des terres étaient couvertes de végétation contre 0,8% dans les parcelles témoins. Les amendements chimiques les plus couramment utilisés sont l'acide sulfurique, le soufre et le gypse qui nécessitent un soin particulier lors de l'application en raison de la nature corrosive de l'acide (Azzeme et Abdullah, 2019). La finalité de chacune de ces techniques est l'augmentation des ions Ca^{2+} dans le sol (Ndour, 2006), car ces ions ont tendance à occuper la place du Na^+ et aident à modifier les situations nocives (Qadir *et al.*, 2014).

c) Les méthodes biologiques

La revégétalisation est l'une des méthodes biologiques les plus utilisées pour la réhabilitation des terres dégradées par la salinisation. En effet, les terres salées ne doivent pas être laissées nues ou non cultivées ; au cas contraire il y aura un flux constant d'eau vers le haut qui conduit à une évaporation continue favorisant la précipitation de sels à la surface du sol (Shankar et Evelin, 2019). Ainsi, plus de 1500 espèces de plantes (les arbustes, les herbes et les arbres) qui ont une grande capacité à tolérer le sel ont été reconnues par la recherche moderne (Shankar et

Evelin, 2019). Au Sénégal, les essences forestières (les genres *Casuarina*, *Eucalyptus*, *Melaleuca*, *Acacia*, *Tamarix* et *Atriplex*) susceptibles de se développer sur des sols salés sont essentiellement sélectionnées et plantées dans les *tannes* enherbées et dans les *tannes* arbustives en début d'hivernage (Ndour, 2006).

Ces espèces appelées halophytes ont la capacité inhérente de croître et de se reproduire dans des milieux salés en éliminant les excès de sels de leur zone racinaire (Montoroi, 2018). Elles jouent un rôle essentiel de protection des ressources du sol, notamment en réduisant la salinisation et en prévenant l'érosion ; ce qui induit la fertilisation du sol (FAO, 2015). Les études de Duponnois *et al.*, (2005) ont montré que l'établissement de plantes appropriées améliore les propriétés biologiques et physiques du sol.

En outre, beaucoup d'études ont révélé que l'association de ces plantes avec des microorganismes bénéfiques du sol comme les bactéries fixatrices d'azote ou les champignons mycorhiziens améliore leur tolérance à la salinité (Ngom *et al.*, 2016 ; Djighaly *et al.*, 2018).

II. Les microorganismes symbiotiques et la tolérance au sel des plantes

1) Généralités sur les symbioses microbiennes végétales

La salinité est l'un des facteurs environnementaux limitant la productivité des plantes cultivées dont la plupart d'entre elles sont sensibles. Elle ne cesse de prendre de l'ampleur sur les terres arables (Shrivastava et Kumar, 2015). Cependant, les microorganismes du sol; des ingénieurs écologiques rentables, sont responsables de la production agricole durable car ils sont probablement préoccupés par les stress environnementaux comme la salinité (Kumar et Akhtar, 2019). En effet, certaines bactéries et champignons sont capables d'interagir avec les plantes et de former des associations bénéfiques qualifiées de symbioses (Vincent, 2018). Ces symbioses peuvent être divisées en deux types selon le microorganisme impliqué ; la symbiose fixatrice d'azote qui résulte d'une association avec les bactéries et la symbiose mycorhizienne impliquant les champignons.

a) La symbiose fixatrice d'azote

Les plantes ont besoin de l'azote tout au long de leur vie du fait qu'il est le principal composant des acides aminés essentiels, des acides nucléiques, de la chlorophylle, des coenzymes et de nombreux produits secondaires de végétaux (Nishida et Suzaki, 2018). Or, la majeure partie de cet azote se trouve sous forme de diazote atmosphérique et n'est pas directement assimilable par les plantes (anonyme, 2016). Pour faire face à la rareté de l'azote assimilable, un groupe de plantes est capable de former des associations symbiotiques efficaces avec des bactéries du sol

(Hocher *et al.*, 2019). Ces bactéries sont capables de convertir le diazote atmosphérique en ammonium qui peut être utilisé par les plantes couvrant ainsi leurs besoins en azote (Boivin *et al.*, 2019). Cette conversion se réalise grâce au complexe enzymatique nitrogénase par la réaction suivante : $N_2 + 8H + 16 ATP \rightarrow 2NH_3 + H_2 + 16ADP + 16Pi$ (Bulgarelli *et al.*, 2013). Ce type de symbiose nécessite la formation de nouveaux organes racinaires, appelés nodules qui sont le siège de l'activité symbiotique où les bactéries se transforment en « bactéroïdes » de plus grande taille et fixent l'azote atmosphérique qu'ils transfèrent à la plante sous une forme combinée assimilable et en contrepartie, la plante fournit les éléments nutritifs assurant le développement de la bactérie (Selami, 2017). Selon le genre de bactérie impliqué, il existe deux types de symbioses fixatrices d'azote ; celle impliquant les légumineuses avec des protéobactéries du genre *Rhizobia*, et celle impliquant les plantes actinorhiziennes avec les actinobactéries du genre *Frankia* (Hocher *et al.*, 2019). Contrairement au rhizobium, les *Frankia* qui sont des actinomycètes filamenteux du sol à gram positive, sont capables de fixer le diazote non seulement à l'état symbiotique mais aussi à l'état libre (Sy, 2006). Ils présentent une large spectre d'hôtes avec un degré de spécificité variable et peuvent se différencier en trois types cellulaires, tous présents à l'état symbiotique (sauf quelques exceptions) : les hyphes septées et ramifiées, les vésicules sphériques et cloisonnées et les sporanges, multiloculaires (Selami, 2017). Les symbioses fixatrices d'azote sont responsables de la réduction de plus de 120 millions de tonnes d'azote atmosphérique par an (Cotin-Galvan, 2014). De ce fait, les plantes impliquées dans ce mécanisme sont largement utilisées pour la restauration des sols dégradés et en agroforesterie (Ribeiro-Barros *et al.*, 2019).

b) La symbiose mycorhizienne

Le mot mycorhize, créé par Franck en 1885, est d'origine gréco-latine ; il vient de l'association de deux mots, l'un grec « *mykés* » qui signifie champignon et l'autre latin « *rhiza* » qui veut dire racine (Adjanohoun *et al.*, 2017). Ainsi, la mycorhization est une association durable basée sur des échanges réciproques entre les racines des végétaux et certains champignons du sol (Duponnois *et al.*, 2013). Ils existent différents types de mycorhizes, en fonction de la morphologie de l'interaction, caractérisés par une interaction superficielle (ectomycorhize) ou interne (endomycorhize) (Selami, 2017) (voir figure 3).

Les ectomycorhizes : les champignons couvrent les meilleures racines nourricières en formant une gaine d'hyphes appelée « manchon » et poussent leurs hyphes étroitement entre les cellules épidermiques ou corticales des racines nourricières du premier et du second ordre (Tedersoo et

Bahram, 2019) sans pénétrer les cellules végétales. Elles impliquent une très grande variété de champignons Basidiomycètes, Ascomycètes ou Zygomycètes (Tedersoo *et al.*, 2010).

Les endomycorhizes: dans ce type de symbiose les hyphes fongiques se trouvent à l'intérieur des cellules corticales (Duponnois *et al.*, 2013). Plusieurs types d'endomycorhizes peuvent être différenciés en fonction de la morphologie de l'appareil fongique intracellulaire : les mycorhizes des Ericacées et des Orchidées où les hyphes du champignon forment un peloton à l'intérieur des cellules du parenchyme cortical et les mycorhizes à arbuscules où les hyphes du champignon se ramifient à l'intérieur des cellules du cortex racinaire (Duponnois *et al.*, 2013).

Cependant, il existe un troisième type de mycorhize qui présente à la fois la présence du manchon mycélien et le développement d'hyphes inter et intracellulaires ; les ectendomycorhizes (Selami, 2017). Elles se rencontrent chez les Arbutacées, les Monotropacées et sont formées par des Basidiomycètes (Duponnois *et al.*, 2013).

Dans cette étude nous intéressons uniquement à la symbiose endomycorhizienne à arbuscules.

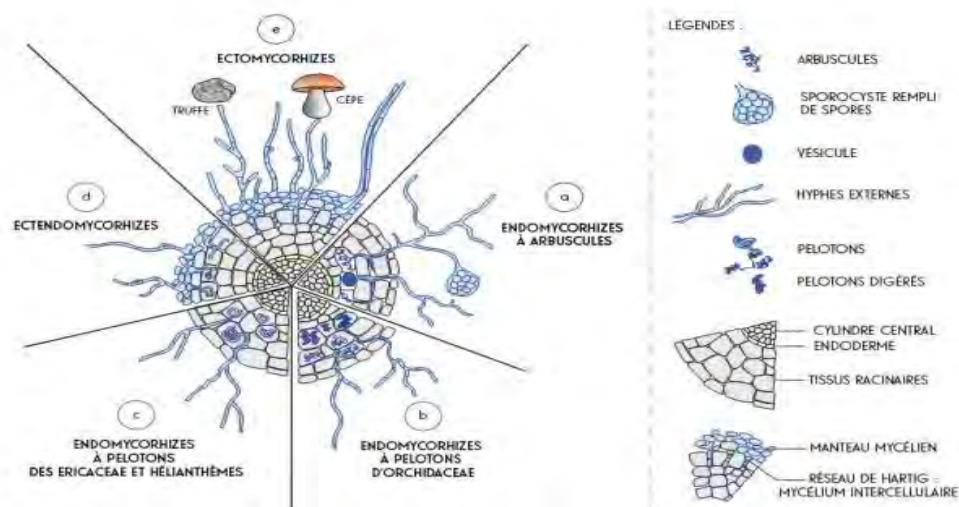


Figure 2: Les principaux types de morphologie mycorhizienne, représentés sur une coupe transversale de racine. **(a)** endomycorhizes à arbuscules ; **(b)** endomycorhizes à pelotons d'Orchidaceae ; **(c)** endomycorhizes à pelotons des Ericaceae et Hélianthèmes ; **(d)** ectendomycorhizes ; **(e)** ectomycorhizes © A. Gallien - Ac-Dijon (Modifié de M.-A. Selosse et F. Le Tacon) Source : (Sélosse, 2018)

- La symbiose endomycorhizienne à arbuscules

La symbiose endomycorhizienne à arbuscule est un phénomène naturel largement répandu, impliqué dans la nutrition minérale d'une grande majorité des espèces végétales terrestres et dans le cycle du carbone entre les plantes et le sol (Drigo *et al.*, 2010).

Les champignons impliqués dans cette symbiose appartiennent à l'ordre des Gloméromycètes et colonisent plus de 80% des plantes à fleurs du fait qu'ils sont des symbiotes obligatoires (s'appuie sur le carbone fourni par la plante) (Javot *et al.*, 2007).

Dans ce type de symbiose, le transport des différents nutriments minéraux et carbonés est bidirectionnel à travers les interfaces symbiotiques au sein des cellules racinaires de l'hôte (Wang *et al.*, 2017). Ainsi, ce type de symbiose est un mutualisme où les CMA peuvent fournir à la plante hôte jusqu'à 80% du phosphate, 25% d'azote, 10% du potassium, 25% du zinc et 60% du cuivre, en échange qu'ils reçoivent 20% du carbone de la plante hôte (Parniske, 2008). Cette symbiose n'exige pas la spécificité d'hôte car une plante donnée peut être mycorhizée par différentes espèces de champignons et ces derniers sont capables de mycorhizer simultanément deux plantes adjacentes d'espèces ou de genres différentes (Lee *et al.*, 2013). Ce large spectre d'hôte des CMA pourrait être dû à l'hétérogénéité des matériels génétiques de ces organismes, leur conférant alors une diversité dans les systèmes de reconnaissance et de signalisation entre partenaires (Smith et Read, 2008) cité par (Ndour, 2017).

- **Etablissement de la symbiose endomycorhizienne**

Le processus de la mise en place de la symbiose endomycorhizienne peut être scindé en trois phases :

- **la phase a-symbiotique**: elle correspond à la germination spontanée des spores et l'émission d'un tube germinatif sous l'effet de facteurs environnementaux et sans contact physique avec le partenaire végétal (Bécard *et al.*, 2004). Le tube germinatif développe des hyphes qui vont croître et se ramifier pour la recherche d'un hôte (Selami, 2017).

- **La phase pré-symbiotique**: elle correspond d'une part à la libération des exsudats racinaires (les strigalactones) induisant l'activité métabolique et une ramification intense des hyphes du champignon qui poussent vers les racines de la plante hôte (Waters *et al.*, 2017). D'autre part, les champignons sécrètent des signaux diffusibles (les facteurs Myc) entraînant dans les cellules végétales des variations de concentration en calcium dans le cytosol et le noyau, la régulation de la transcription des gènes et la ramification des racines (Balzergue, 2012). Ces échanges de signaux se font sans contact direct entre les deux partenaires provoquant ainsi la mise en place de la symbiose proprement dite.

- **La phase symbiotique** : Cette phase correspond à l'infection et à la colonisation des racines de la plante par le champignon. Une fois que le champignon est en contact avec l'épiderme de la racine il y a la formation des hyphopodes puis il s'en suit la mise en place d'un appareil de pré-pénétration (PPA) favorisé par une réorganisation de la cellule épidermique située sous l'hyphopode (Balzergue, 2012). Les hyphes, à travers le PPA pénètrent la racine et se

développent dans les cellules corticales racinaires, formant des structures très ramifiées appelées arbuscules qui sont des organes de réserves des champignons (Wang *et al.*, 2017). Ainsi, le transport des nutriments vers la plante hôte serait assuré par les hyphes intra et extracellulaires et en retour la plante approvisionne le champignon en carbone (Selami, 2017).

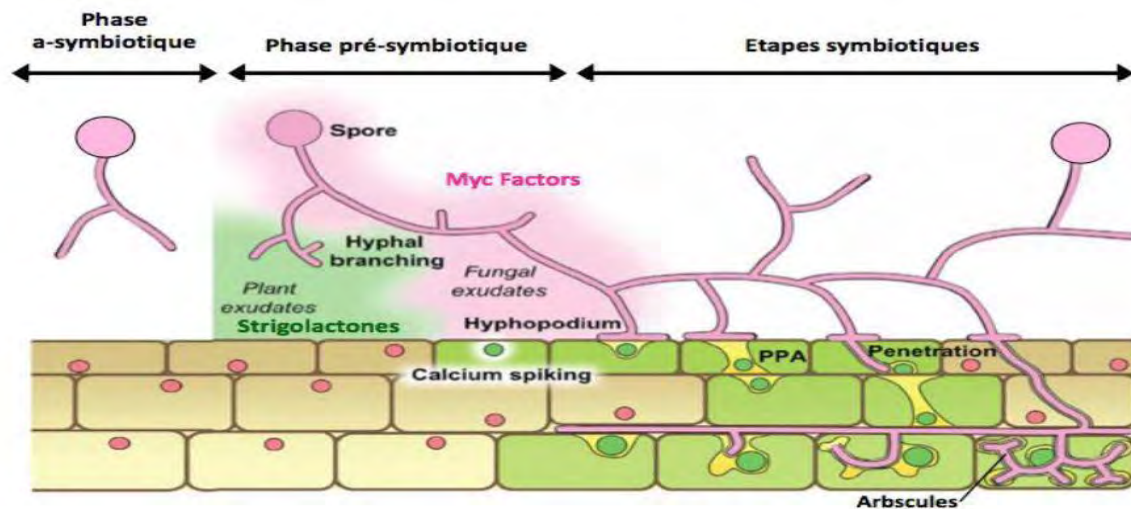


Figure 3: Les trois étapes de l'établissement de la symbiose mycorhizienne à arbuscules (Bonfante et Genre, 2010).

2) Effet des champignons mycorhiziens à arbuscules sur la tolérance au stress salin chez les plantes

La symbiose mycorhizienne à arbuscules améliore la performance et la résistance des plantes au stress salin par une atténuation du stress qui leur permet d'améliorer leur croissance (Bhardwaj *et al.*, 2014). En effet, beaucoup d'auteurs ont démontré une croissance et un développement plus important chez les plantes inoculées avec des CMA par rapport aux non inoculées en condition de stress salin (Djighaly, 2019 ; Diagne, 2016).

Des résultats similaires ont été obtenus par Leye *et al.*, (2015) qui ont démontré que l'inoculation des plantes de *Jatropha* avec trois souches de CMA (*Glomus mosseae*, *Rhizophagus fasciculatus*, *Glomus aggregatum*) entraîne une amélioration de la croissance et de la biomasse à des niveaux de salinité supérieurs à 300 mM et d'eau de mer diluée (50% EM) (Leye *et al.*, 2015). De même, les travaux de Djighaly (2014) ont aussi montré une augmentation de la hauteur moyenne et de la production en biomasse sèche totale des plantes inoculées avec la souche *Rhizophagus fasciculatus* par rapport aux plantes témoins (Djighaly, 2014).

Cette amélioration est en général attribuée au rôle important que jouent les CMA dans la nutrition hydrominérale des plantes (Trouvelot *et al.*, 2015). En effet, les hyphes du champignon très denses, ramifiés provoquent une augmentation de la surface d'absorption des racines en eau et en nutriments notamment le phosphore (Gerbeaud, 2014). Plusieurs auteurs ont montré que les CMA entraînent une amélioration de la nutrition minérale (P, N, K, Ca, Cu, Fe, Zn) des plantes en condition saline (Chakraborty *et al.*, 2019 ; Druege et Franken, 2019). Des résultats similaires ont été obtenues par Navarro *et al.*, (2014) qui ont démontré que les CMA modifient les réponses de l'hôte au stress salin en améliorant la nutrition des plantes en P, Cu, K et Fe (Navarro *et al.*, 2014). De plus, les CMA augmentent la disponibilité et l'efficacité de l'utilisation de l'eau grâce aux filaments très fins des hyphes qui peuvent contribuer jusqu'à 20% du total d'eau absorbé par la plante (Ruth *et al.*, 2011) et à la régulation d'aquaporines dont la plupart peuvent transporter de l'eau ainsi que d'autres molécules (CO₂, O₂, silicium, bore, urée ou ammoniac) d'importance physiologique pour la performance des plantes (Chun *et al.*, 2018). De ce fait, ils participent au maintien de la pression de turgescence des feuilles et influencent positivement la photosynthèse, la transpiration et la conductance stomatique (Wang *et al.*, 2017). En plus, les CMA participent à l'augmentation de l'accumulation d'osmorégulateurs et de certaines enzymes antioxydantes impliquées dans le système de défense de la plante (Evelin *et al.*, 2009). Les résultats de Hashem *et al.*, (2016) ont montré que l'inoculation des CMA chez les plantes de *Lupinus termis* exposées au stress salin a provoqué une augmentation de l'accumulation de composants osmotiques tels que la proline, la glycine bêtaïne et les sucres entraînant le maintien de la teneur en eau des tissus et a amélioré les activités des enzymes antioxydantes comme la superoxyde dismutase (SOD), la catalase (CAT), l'ascorbate peroxydase (APX) et la peroxydase (POD) qui éliminent les espèces réactives de l'oxygène (ROS) ; ce qui permet une atténuation du stress salin (Hashem *et al.*, 2016).

Tous ces mécanismes apportés par les CMA aident la plante à maintenir sa croissance réelle dans un environnement stressant en atténuant l'impact négatif du stress sur la croissance et le développement des plantes (Kumar et Verma, 2018). De ce fait, l'association des CMA avec les plantes est un recours pour la réhabilitation des terres dégradées par la salinisation.

3) Effet des bactéries fixatrices d'azote sur la tolérance au stress salin chez les plantes

Les bactéries fixatrices d'azote améliorent la tolérance des plantes aux stress salins favorisant leur croissance (Oshone *et al.*, 2017). Ainsi, les travaux de Ngom *et al.*, (2016) ont montré que

l'inoculation de *C. glauca* et *C. equisetifolia* avec les souches *Frankia CcI3* et *CeD* a considérablement amélioré la croissance des plantes sous stress salin (Ngom *et al.*, 2016). Cette amélioration se manifeste par un accroissement de l'absorption des nutriments, de la production d'hormones végétales, de l'accumulation d'osmorégulateurs et d'antioxydants favorisé par les bactéries (Chakdar *et al.*, 2019). Du fait de leur capacité à fixer l'azote, à solubiliser les phosphates et à mobiliser le potassium, les bactéries favorisent l'absorption des nutriments qui peuvent être très utiles pour l'atténuation du stress salin (Yadav *et al.*, 2015). De plus, ces bactéries jouent un rôle important dans la détoxification des ions Na^+ par régulation des transporteurs vacuolaires impliqués (H^+/ATPase) chez la plante pour l'atténuation du stress (Chatterjee *et al.*, 2018). En outre, diverses espèces bactériennes comme certaines souches de *Frankia* possèdent aussi la capacité de produire des hormones végétales telles que l'auxine (généralement l'acide indole acétique), la gibbérelline, l'acide abscissique etc. (Perrine-Walker *et al.*, 2010) qui sont connues pour moduler le développement et l'architecture des racines ainsi que la signalisation en réponse au stress (Chen *et al.*, 2017). Les études de Egamberdieva (2010) révèlent que les racines des semis sous 100 mM de NaCl inoculés avec des souches de *Pseudomonas* produisant l'acide indole acétique (AIA), augmentent leur croissance de près de 52% par rapport au témoin (Egamberdieva *et al.*, 2010).

Ainsi, vu le rôle important que jouent les bactéries fixatrices d'azote dans la symbiose pour l'atténuation du stress salin chez les plantes, ce mécanisme a été largement utilisé pour la restauration des terres dégradées par la salinité (Sharma *et al.*, 2013). Les études de Vincent (2018) suggèrent que la symbiose fixatrice d'azote contribue de manière significative dans l'adaptation des *Acacia spirorbis* à des sols dégradés (Vincent, 2018).

Cependant, l'amélioration de la croissance des plantes par les microorganismes dépend de l'efficacité de la symbiose et de la tolérance intrinsèque de la plante hôte (Djighaly, 2019). Sayed (2011) révèle que lors d'une symbiose actinorhizienne les souches de *Frankia* sélectionnées doivent être adaptées à la fois aux conditions environnementales et aux espèces végétales hôtes (Sayed, 2011). Ngom *et al.*, (2016) affirment que l'inoculation de *C. glauca* et *C. equisetifolia* avec les souches *Frankia CcI3* et *CeD* a amélioré la croissance des plantes sous stress salin selon les couples symbiotiques *Casuarina-Frankia* associés (Ngom *et al.*, 2016). De même, pour la mycorhization, les résultats de Djighaly *et al.*, (2018) ont montré une croissance plus importante chez les plantes de *Casuarina* inoculées avec *R. fasciculatus* que chez les autres individus inoculés avec deux autres types de champignons (Djighaly *et al.*, 2018). De plus, il a été démontré que des isolats de *Glomus mossea* issus de sols salés

augmentaient significativement le poids sec chez le cotonnier par rapport à des isolats issus de sols non salés (Tian *et al.*, 2004).

III. Généralités sur le *Melaleuca*

1) Classification botanique

Le *Melaleuca leucadendron* (L. 1767) appartient au règne des *Plantae*, sous règne des *Tracheobionta*, division des *Magnoliophyta*, classe des *Magnoliopsida*, ordre des Myrtales, famille des *Myrtaceae*, genre des *Melaleuca* (Patel *et al.*, 2018).

2) Description du genre

Le genre *Melaleuca* appartient à la famille des *Myrtacées* qui comprend plus de 3.000 espèces réparties dans 140 genres dont principalement les *Eucalyptus*, *Melaleuca*, *Eugenia*, *Syzygium*, *Myrcia*, *Psidium* et *Calyptranthes* (Chabert, 2014).

Le nom botanique *Melaleuca* composé de deux termes empruntés au grec : *melan* μέλαν « noir » et *leucos* λευκος « blanc » fait référence au motif noir et blanc sur les troncs de ces espèces (noirâtre et comme brûlé dans sa partie inférieure, blanchâtre dans sa partie supérieure) (Franklin *et al.*, 2007). Il a été officiellement décrit pour la première fois sous le nom de *Myrtus* en 1762 dans « *especies Plantarum* » par Carl Linnaeus qui lui donna en 1767 le nom de *Melaleuca* (Patel *et al.*, 2018). Le genre *Melaleuca* comprend environ plus de 250 espèces d'arbres et d'arbustes (Hussein *et al.*, 2007) qui sont connues sous le nom d'arbres à thé très riches en huiles essentielles (Farag *et al.*, 2004). Ce genre n'a jamais été formellement défini morphologiquement mais les publications taxonomiques diagnostiquent le genre par la combinaison de fruits capsulaires trilobulaires et d'inflorescences «en brosse» (Edwards *et al.*, 2010). Ces dernières étant caractérisées comme des têtes ou des épis de fleurs sessiles ayant des étamines nettement plus longues que les pétales. Les étamines sont fondamentalement fusionnées en cinq faisceaux opposés aux pétales et ont des anthères polyvalentes (Edwards *et al.*, 2010). Parmi les espèces de ce genre se trouve le *Melaleuca leucadendron* (L.) qui est un arbre atteignant parfois 20 m de haut avec un tronc recouvert d'écorce épaisse et blanche de papier (parfois rosâtre ou crème) et de branches fines (Patel *et al.*, 2018). Les feuilles disposées alternativement sont plates, étroites en forme de lance et effilées en pointe présentant 5 (parfois jusqu'à 9) nervures longitudinales. Elles sont longues de 75 à 270 mm et larges de 6,5 à 40 mm (Brophy *et al.*, 2013). La floraison peut se produire à tout moment de l'année et les fruits sont des capsules ligneuses de 3,9 à 4,9 mm de long en grappes lâches le long des tiges (Brophy *et*

al., 2013). Cette espèce est d'origine australienne et elle a une croissance relativement rapide ; la croissance moyenne en hauteur atteint souvent 1 à 2 m par an (Doran et Gunn, 1995).

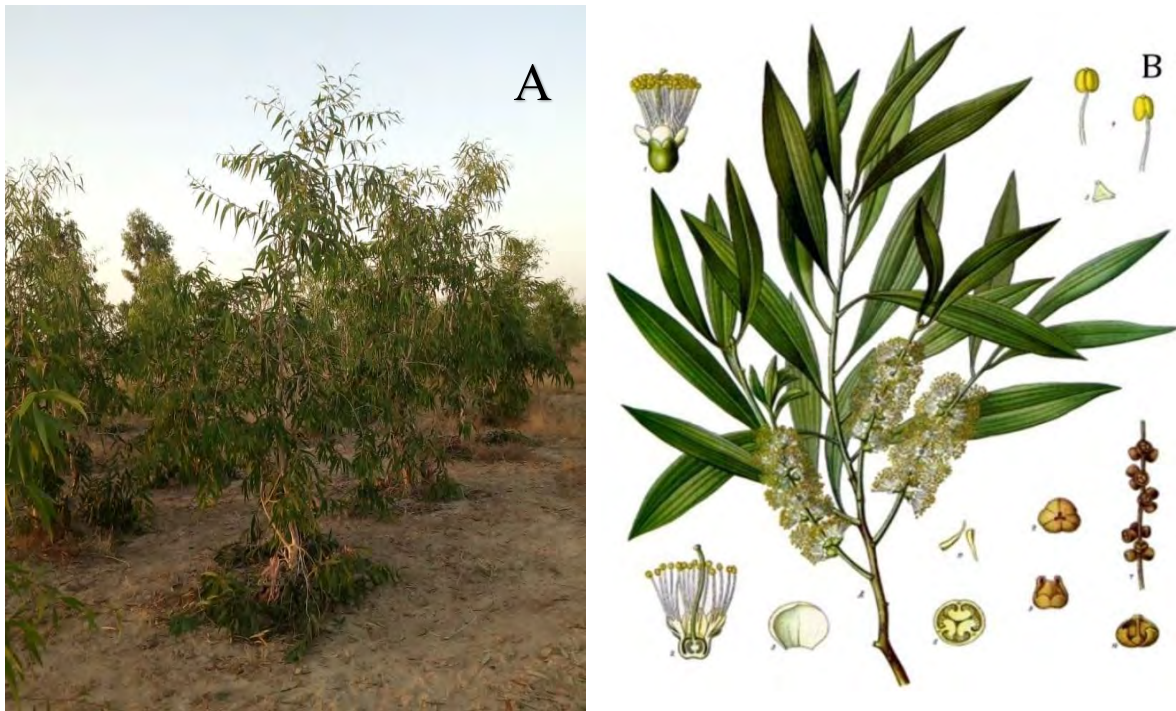


Figure 4: Aspect morphologique de *M. leucadendron* (L.) A: arbres de *M. leucadendron* ; B: rameau de *M. leucadendron* avec ses organes reproductifs (source : Ndong, 2018)

3) Écologie

Les *Melaleuca* se développent principalement en Australie, et font parties des composantes dominantes de la flore australienne, occupant tous les biomes et divers habitats (Edwards *et al.*, 2010). Ils sont très répandus dans les zones tropicales ou subtropicales notamment en Indonésie, en Nouvelle-Calédonie, en Nouvelle-Guinée et dans les îles du détroit de Torres (Franklin *et al.*, 2007). Ces espèces se trouvent dans un large éventail d'habitats, y compris les dunes de sable du désert, les plateaux d'argile, la savane, la forêt de sclérophylle et les zones humides éphémères, y compris les vasières (Edwards *et al.*, 2010). Elles préfèrent un emplacement ensoleillé mais tolèrent les sols pauvres et gorgés d'eau par résilience (Patel *et al.*, 2018). Ainsi Franklin *et al.*, (2007) ont révélé que le *Melaleuca* est très résilient et est favorisé par les perturbations par le feu et /ou les eaux de crue du fait que les semis se trouvaient plus fréquemment dans les zones récemment brûlées et en particulier là où les incendies avaient été graves.

4) Usages

Traditionnellement les autochtones utilisaient l'écorce des arbres de *Melaleuca leucadendron* (L.) pour fabriquer des canots d'écorce, pour construire des huttes étanches, envelopper les aliments avant de les cuire dans les fours souterrains mais aussi les feuilles écrasées étaient utiles pour les infections respiratoires et les fleurs pour faire une boisson sucrée (Patel *et al.*, 2018). Beaucoup d'espèces de la famille des *Myrtacées* sont souvent productrices d'huiles essentielles qui possèdent des propriétés thérapeutiques (Chabert, 2014). A cet effet, les espèces du genre *Melaleuca* fournissent des huiles essentielles dont la composition qualitative est assez proche mais diffère quantitativement d'une espèce à une autre (Pierrick, 2019). En effet, beaucoup d'auteurs ont affirmé que ces huiles ont des propriétés antimicrobiennes, antifongiques, antivirales, antiseptiques mais aussi antioxydantes (Farag *et al.*, 2004 ; Noosidum *et al.* 2008). Les études de Farag *et al.* (2004) révèlent que les huiles essentielles de *Melaleuca ericifolia*, *Melaleuca leucadendron* et *Melaleuca armillaris* présentent des effets inhibiteurs contre le *Bacillus subtilis* et *Aspergillus niger* et contre le virus *Herpès simplex* de type 1 (HSV - 1). En plus, le *Melaleuca armillaris* permettait l'amélioration des paramètres du superoxyde dismutase. Noosidum *et al.* (2008) ont aussi rapporté que les huiles essentielles de *Melaleuca leucadendron* (L.) présentent des propriétés irritantes et répulsives importantes contre *Aedes aegypti* (L.). De plus, le *Melaleuca leucadendron* (L.) peut être utilisé dans la chimio-prévention du cancer ou dans la thérapie anticancéreuse (Surh et Yun, 2012).

Cependant, les *Melaleuca* ont un intérêt écologique considérable plus important que leur valeur commerciale (Tran *et al.*, 2015). En effet, ces espèces sont largement utilisées pour la valorisation et la restauration des terres dégradées par le défrichage ou par la salinisation ; du fait de leur résilience, leur croissance rapide et leur tolérance à la salinité (Broadhurst *et al.*, 2005). Ainsi les résultats obtenus par Ndour (2006) affirment que les *Melaleuca* sont capables de se développer sur les tannes enherbées et arbustives de même que les bas-fonds (Ndour, 2006). Ces espèces sont aussi utilisées pour l'atténuation des changements climatiques grâce à leur capacité à stocker des quantités importantes de carbone (Tran *et al.*, 2015). En outre, l'importance de son bois qui peut être utile pour la construction de poteaux et de copeaux de bois fait que cette espèce est largement cultivée dans les parcs des zones tropicales et subtropicales (Patel *et al.*, 2018).

5) La tolérance au stress salin des *Melaleuca*

Les espèces de *Melaleuca* sont résistantes aux contraintes environnementales et s'adaptent aux sols acides, infertiles et marécageux (Naidu *et al.*, 2000 ; Aini, 2012). Les *Melaleuca* sont très

tolérantes au sel ; elles sont capables de se développer dans des sols sodiques ou salins avec une tolérance très élevée (Tran *et al.*, 2015 ; Nguyen *et al.*, 2009). En effet, Tran *et al.* (2015) ont rapporté que les grains de *Melaleuca leucadendron* (L.) sont capables de germer et pousser dans des sols très sodiques présentant un pourcentage de sodium échangeable de 21,16% dans l'horizon supérieur (0-10 cm) du sol. De plus les études d'Aini *et al.*, (2012) portant sur l'évaluation de la réponse écophysologique de trois espèces de *Melaleuca* (*M. Halmaturorum*, *M. thyoïdes* et *M. nesophila*) à la salinité ont montré que toutes les espèces ont survécu à des concentrations élevées de sel. Cette tolérance à la salinité s'explique par le fait que ces espèces ont la capacité à exclure les ions Na^+ et Cl^- hors des cellules évitant leur toxicité mais aussi de produire des osmolytes comme la proline ou ses dérivés pour ajuster leur pression osmotique (Carter *et al.*, 2006) ou encore de séquestrer le sel dans les racines minimisant l'exposition des cellules foliaires qui contiennent les appareils photosynthétiques (Aini, 2012). Ainsi les *Melaleuca* ont été classées parmi les espèces les plus tolérantes au sel et même il a été affirmé qu'elles sont plus résistantes au sel que les espèces d'*Eucalyptus* et de *Casuarina* pouvant se développer dans les zones très salées (Aini, 2012). De ce fait, elles sont largement utilisées pour la restauration des terres dégradées par la salinisation, mais aussi en agroforesterie et en sylviculture.

Cependant, une meilleure résistance au stress peut être obtenue par une association des plantes et de champignons mycorhiziens à arbuscules (CMA) (Evelin *et al.*, 2009). Toutefois, les études de Ndour et Ngom (2014) ont montré que l'inoculation avec *R. fasciculatus* a entraîné une atténuation du stress salin chez les plantes de *Melaleuca* (*M. viridiflora* et *M. acacioides*) cité par (Ndong, 2018).

Chapitre II : Matériel et méthodes

I. Justification sur le choix et présentation du site de la plantation de *Melaleuca*

1) Justification sur le choix du site

Le site a été choisi sur la base de la réhabilitation et de la valorisation agrosylvopastorale des terres dégradées par le sel dans la commune de Niakhar (région de Fatick) plus précisément dans le terroir villageois de Ndiémou. Le site à reboiser a été choisi en prenant en considération les teneurs en sel dans le sol car il peut exister une hétérogénéité entre les différents points des sites de la zone et les teneurs peuvent aussi varier considérablement entre la saison des pluies et la saison sèche. Ce choix qui s'est fait en accord avec la population locale s'avère aussi important, car reboiser les tannes herbeuses à Ndiémou pourrait permettre de limiter l'avancée du sel.

2) Présentation du site de la plantation de *Melaleuca*

a) Localisation

La zone d'étude est située dans le terroir villageois de Ndiémou de la commune de Niakhar (région de Fatick) l'une des communes les plus touchées par la salinité dans la région de Fatick. Située à 150 km à l'est de Dakar, la commune de Niakhar couvre une superficie de 205 km² avec une population de 32 000 habitants (en 2015) soit une densité de 156 habitants/km² (Ndong, 2018).

Le village de Ndiémou est situé à 14°24'0'' de la latitude Nord et à 16°22'0'' de la longitude Ouest. Il est limité au Nord par le village de Godaguéne, au Sud par le hameau de Pokham, à l'Ouest par les localités de Sagne, de Boudaye et de Ngués et enfin à l'Est par le cours d'eau temporaire du Sine lieu d'exploitation du sel (Diouf, 2009).

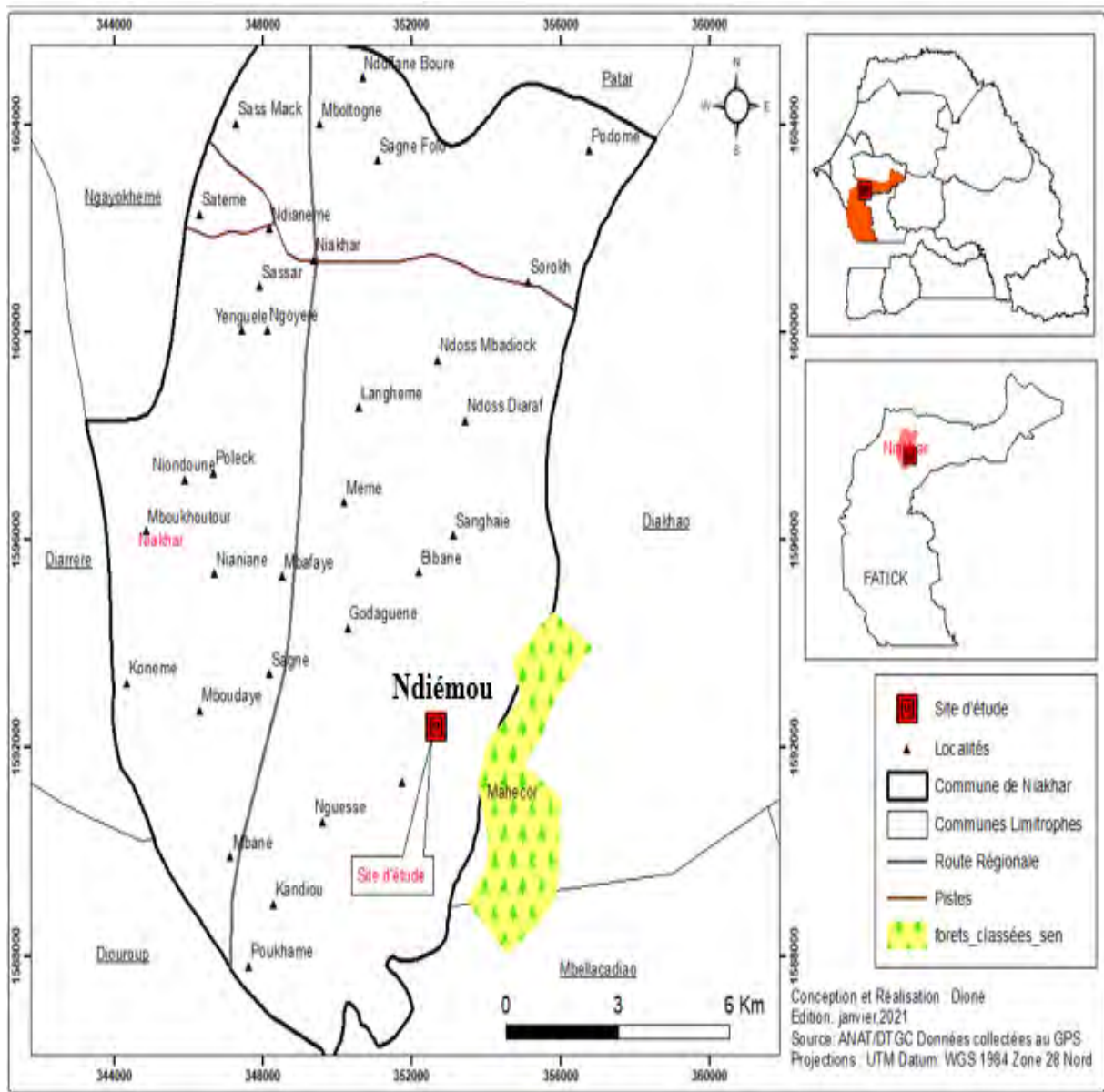


Figure 5 : localisation du village de Ndiémou

b) Caractéristiques biophysiques

Le village de Ndiémou se trouve dans la zone semi-aride soumise au climat sahélo-soudanien continental caractérisé par deux saisons distinctes : une saison sèche de huit à neuf mois et une saison humide de trois à quatre mois (Delaunay, 2014). La saison sèche est fraîche de novembre à mars et chaude de mars à juin durant laquelle les vents dominants sont les alizés maritimes frais (de Nord à Nord-ouest) et continentaux secs (de Est à Nord-est) ou Harmattan (Diouf, 2009). La saison humide qui est chaude de juillet à octobre avec une prédominance des vents de Mousson (d'Ouest à Sud-ouest) correspond à l'hivernage (Diouf, 2009). La moyenne des précipitations annuelles est de 142,5 mm et celle des températures annuelles est de 28,9°C avec

une forte chaleur durant le mois de juin (Ndong, 2018). Malgré la forte pression anthropique, le milieu d'étude présente une végétation ligneuse diversifiée composée d'une strate arbustive, arborée et herbacée. La strate herbacée est dominée par *Eragrostis tenella* (L.) Beauv., *Hygrophila senegalensis* (Nees) T.A , *Spermacoce verticillata* L., *Ctenium elegans* Kunth, *Paspalum vaginatum* L., *Chloris barbata* (L.) Sw., etc.

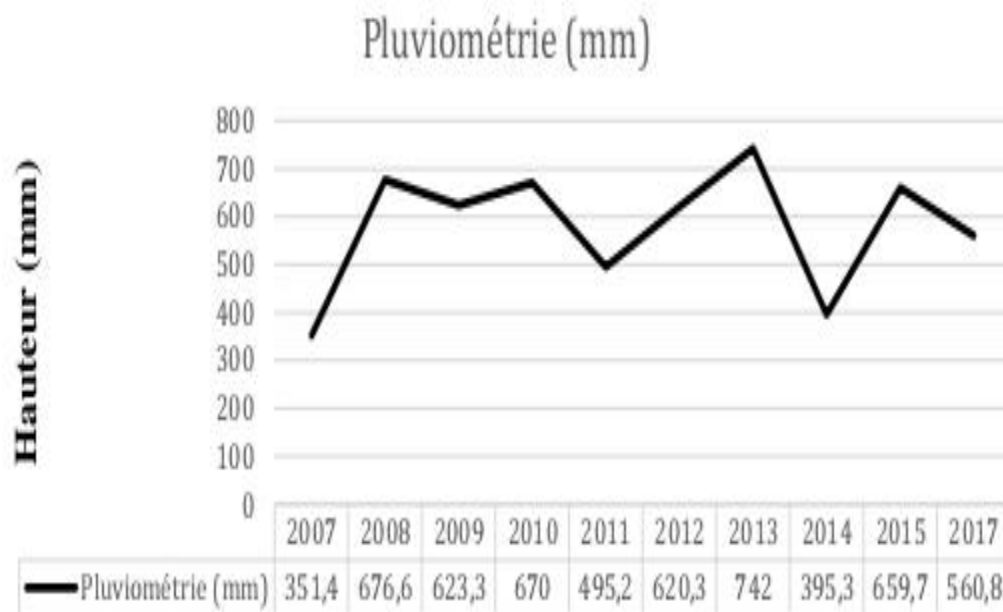


Figure 6: Evolution de la pluviométrie de la commune de Niakhar sur dix ans (2007-2017).

Source : CNRA, 2018.

c) Activités socio-économiques

Les principales sources de revenus restent la saliculture et l'agriculture avec des pourcentages respectifs de 42,3 et de 37,6% des ménages. D'autres activités génératrices de revenus sont développées par les populations notamment l'élevage qui représente 12,8% des ménages, le commerce 5% et la pêche 2,3% (Diouf, 2009).

d) Géomorphologie

Sur le plan géomorphologique la zone présente des tannes herbues qui forment des tapis herbacés en absence d'efflorescence saline pendant la saison des pluies. Ces tannes sont utilisées sous forme de glèbes rizicoles et l'élevage y est pratiqué (Diouf, 2009). Les ressources pédologiques font état de trois (3) types de sols que sont : les sols ferrugineux lessivés ou sols Dior ; les sols hydromorphes ou sols Deck-dior qui sont des formations argileuses, argilo-sableuses ou de limons et les tannes qui sont des sols halomorphes et salins (Fann, 2014).

II. Matériel

- Matériel végétal

Le matériel végétal utilisé pour cette étude est constitué de plantes de *M. leucadendron* (L.) âgées de deux ans. Pour rappel, les semis étaient fournis par le Service des Eaux et Forêts de Fimela et les plantes étaient en pépinière pendant 4 mois puis transplantés sur le site expérimental en août 2017.

- Matériel microbien

Les microorganismes utilisés pour inoculer les plantes de *Casuarina* qui ont précédées les *Melaleuca* sont la souche bactérienne fixatrice d'azote *Frankia Cc16* et un champignon mycorhizien à arbuscule ; le *Rhizophagus fasciculatus* (Thaxter sensu Gerdemann Gerd.). Ils proviennent de la collection de microorganismes symbiotiques du Laboratoire Commun de Microbiologie (LCM/IRD/ISRA/UCAD). Ces souches (*Frankia Cc16* et *Rhizophagus fasciculatus*) ont été choisies en raison de leur capacité à tolérer le sel (Oshone *et al.*, 2013 ; Diagne *et al.*, 2014).

III. Méthodes

1) Mise en place du dispositif expérimental

L'essai est mis en place dans une parcelle de 5400m² (90m*60m) et selon un dispositif en blocs complets randomisés. Ce dispositif est composé de 4 répétitions contenant chacune 4 blocs. Chaque bloc contient 4 lignes dont chacune comporte 8 plantes correspondant à un traitement. Ainsi dans chaque bloc, nous avons (4*8) = 32 plantes, ce qui fait (32*4) = 128 plantes par répétition. Dans toute la parcelle nous avons (128*4) = 512 plantes. Les répétitions sont séparées de 4m et l'écartement entre deux blocs est de 4m. L'écartement entre deux traitements du même bloc est de 2m et celui entre deux plantes est aussi de 2m. Il est important de rappeler que dans ce dispositif où l'essai est mis en place, il y avait des plantes de *C. obesa*, *C. glauca*, *C. equisetifolia* et *C. cunninghiamiana* préalablement soumis à quatre traitements effectués en serre (plantes témoins, plantes inoculés avec *Rhizophagus fasciculatus*, plantes inoculés avec *Frankia Cc16* et des plantes double inoculés (*Rf+Cc16*)). Ces *Casuarinas* préparés en pépinière pendant 4 mois ont été transplantés en septembre 2016. Une forte mortalité de ces plantes causée par la divagation des animaux a été enregistrée. Ainsi, dans le but d'évaluer l'impact du précédent inoculum, et continuer les actions de réhabilitation du site, des plantes de *M. leucadendron* (L.), âgées de 4 mois et non inoculées ont été transplantés en août 2017 sur le même dispositif expérimental.

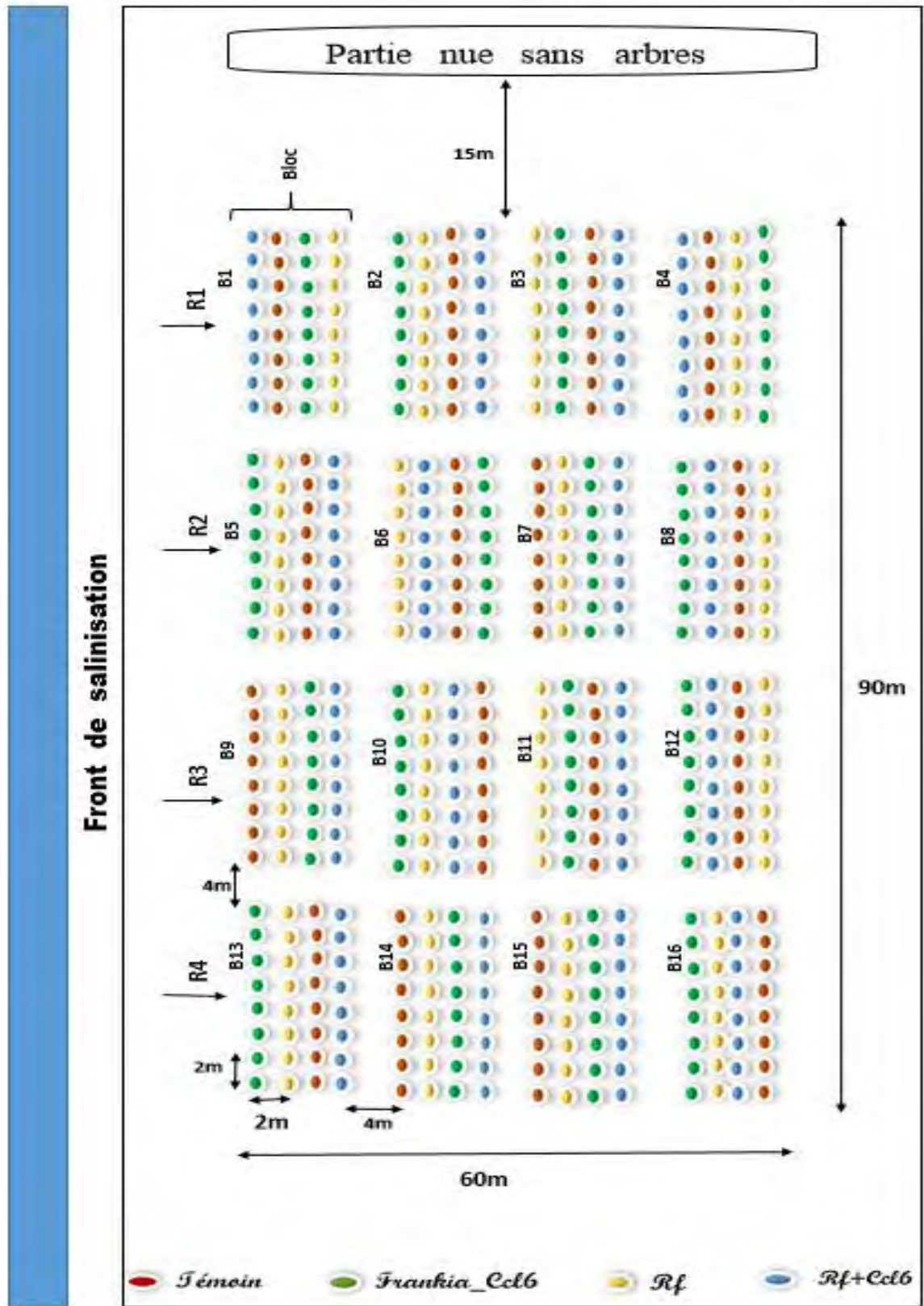


Figure 7: Dispositif expérimental

2) Mesure de la croissance des plantes de *Melaleuca leucadendron* (L.)

Pour mesurer la croissance des plantes, un certain nombre de paramètres ont été mesurés à savoir la hauteur, les diamètres au collet à 0,3m du sol et du houppier (Nord-Sud et Est-Ouest). La hauteur (cm) des plantes a été mesurée en utilisant une règle graduée et les diamètres au collet (cm) et du houppier (cm) à l'aide d'un ruban mètre. Après l'évaluation de ces paramètres, le taux de survie des plantes de *Melaleuca leucadendron* (L.) a été déterminé à l'aide de la formule suivante :

$$\text{Taux de survie} = \frac{\text{nombre de plants vivants}}{\text{nombre total de plants}} * 100$$

3) Etude de la diversité floristique de la végétation herbacée

La plantation de *Melaleuca* qui a été inventoriée a une superficie de 5400 m². La composition floristique a été étudiée par comparaison entre les parcelles sous couvert et les parcelles hors couvert de *Melaleuca*. La méthode phytosociologique de Braun-Blanquet (1928) a été utilisée pour l'inventaire. Elle consiste à noter une seule fois l'espèce pour la strate herbacée accompagnée d'un nombre qui représente l'abondance/dominance (cité par Ndour, 2006).

En fait, pour inventorier les espèces floristiques sous couvert, la parcelle a été divisée en 4 blocs de (30m x 45m). Sur chaque bloc de base, ont été délimitées des sous parcelles de 32 m² qui correspondaient à l'aire minimale. Ainsi, 24 relevés de 32m² (4m*8m) ont été choisis, répartis en 6 relevés de manière aléatoire dans chaque bloc pour prendre en compte l'hétérogénéité du milieu. Et pour étudier la diversité hors couvert, 24 relevés de 32m² (4m*8m) répartis sur quatre blocs situés à 25 m de la plantation et selon les directions Est, Ouest, Nord et Sud, ont été effectués. L'échantillonnage total est égal à 48 relevés de 32 m² dans le site d'étude.

Pour chaque relevé, la liste floristique a été établie et chaque espèce a été affectée un coefficient d'abondance/dominance échelonné de + à 5. Le recouvrement global était estimé sur une échelle allant de 0 à 100% (voir tableau 2). Les échantillons botaniques ont été identifiés sur le terrain et/ou au laboratoire à l'aide de la flore du Sénégal de Berhaut, (1967). Les dénominations ont été actualisées sur la base de l'énumération des plantes à fleurs d'Afrique tropicale de Lebrun et Stork (1991, 1992). Les contributions spécifiques au recouvrement sont ensuite calculées proportionnellement à l'abondance des espèces. Sur la base de cette contribution spécifique au recouvrement, la fréquence centésimale, la Richesse spécifique et les indices de Shannon et Weaver et d'Equitabilité de Piélou, ont été calculés et interprétés.

. **La fréquence centésimale** : permet d'apprécier la distribution des espèces à travers les relevés. Elle renseigne sur la distribution d'une espèce dans un peuplement et s'exprime en pourcentage (%) (Ngom *et al.*, 2013). Elle est estimée par la formule suivante :

$$F = \frac{N_i}{N} \times 100$$

Avec F : fréquence centésimale ; N_i : le nombre de relevé où l'on trouve l'espèce i et N : le nombre total de relevés

. **La contribution spécifique présence** : c'est le rapport exprimé en pourcentage entre la fréquence centésimale d'une espèce et la somme des fréquences centésimales de toutes les espèces; elle traduit la participation de l'espèce en recouvrement de la surface du sol (Ngom *et al.*, 2013)

. **Indice de Shannon et Weaver (H')** : permet de calculer le niveau de diversité d'espèces dans un milieu donné. Elle prend en compte non seulement le nombre d'espèces, mais également la distribution des individus au sein de ces espèces. Cet indice H' qui est souvent compris entre 0 et 4,5 est minimal si tous les individus du peuplement appartiennent à une seule et même espèce; il est maximal quand tous les individus sont répartis d'une façon égale sur toutes les espèces (Diedhiou *et al.*, 2018). Il est calculé selon la formule suivante :

$$H' = - \sum_{i=1}^n p_i \cdot \log_2 p_i ; \text{ où } p_i = \frac{n_i}{\sum n_i}$$

p_i correspond à la proportion relative du recouvrement de l'espèce dans la zone ou dans le groupement et est compris entre 0 et 1 ;

n_i correspond au recouvrement de l'espèce i et

$\sum n_i$ est la somme des recouvrements des espèces de la zone ou du groupement.

. **Indice d'Équitabilité de Pielou** : il exprime la répartition des espèces au sein de l'association (Diedhiou *et al.*, 2018). Cet indice de régularité varie entre 0 et 1 ; il est égal au rapport entre la diversité observée, qui correspond à l'indice de Shannon (H') et une distribution de fréquence des espèces complètement égale, c'est-à-dire la valeur de l'équitabilité maximale (H'_{max}):

$$R = \frac{H'}{H_{max}} ;$$

Avec $H_{max} = \log_2 (S)$ et S étant la richesse spécifique totale

Tableau 2: Echelle de pourcentages des différents indices d'abondance/dominance

Coefficients d'abondance/dominance	Recouvrement de l'espèce en %
+	[0-1[
1	[1-5[
2	[5-25[
3	[25-50[
4	[50-75[
5	[75-100[

Ces coefficients d'abondance-dominance ont été convertis en recouvrement moyen (RM) suivant l'échelle ci-dessous proposée par Braun-Blanquet (1932) cité par Djego *et al.*, (2012):

5: espèces couvrant 75 à 100% de la surface du relevé soit un RM de 87,5% ;

4: espèces couvrant 50 à 75% de la surface du relevé soit un RM de 62,5% ;

3: espèces couvrant 25 à 50% de la surface du relevé soit un RM de 37,5% ;

2: espèces couvrant 5 à 25% de la surface du relevé soit un RM de 15% ;

1: espèces couvrant 1 à 5% de la surface du relevé soit un RM de 3% et;

+: espèces couvrant moins de 1% de la surface du relevé soit un RM de 0,5%.

4) Impact de la plantation de *Melaleuca* sur les propriétés physicochimiques du sol

Pour étudier l'impact des plantes de *Melaleuca leucadendron* (L.) sur les propriétés physicochimiques du sol, des échantillons de sol ont été prélevés à l'horizon 0-20 cm. Les prélèvements de sol ont été effectués à l'intérieur des blocs délimités précédemment lors de l'étude de la diversité floristique. Dans chaque bloc, des prélèvements de 250 g ont été effectués en quatre points différents sur les diagonales pour enfin obtenir un échantillon composite issu du mélange des quantités prélevées dans le même bloc. Au total, huit (8) échantillons composites de sol ont été pris, dont quatre (4) étaient des échantillons du sous couvert. Une comparaison a été faite avec les quatre (4) échantillons composites hors couvert pris dans les 4 blocs situés à 25 m de la plantation suivant les 4 points cardinaux. Les échantillons prélevés ont été mis dans des sachets en plastique numérotés. Et les analyses ont été faits au laboratoire d'analyse Sols – Eaux – Plantes de ISRA/CNRA de Bambey. Les analyses ci-après ont été effectuées :

-Acidité déterminée par le pH de la solution du sol ;

-Salinité déterminée par la conductivité électrique en dS/m à 25°C

- La teneur en éléments nutritifs (carbone, azote, phosphore et matière organique) présente
- Les bases échangeables (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+), la capacité d'échange cationique (CEC) et la saturation.

5) Analyse statistique

Les données obtenues ont été traitées avec le logiciel R version 3.5.0. Le test de normalité de Shapiro Wilk a été effectué, suivi du test F de Fisher pour vérifier l'égalité des variances. D'après ces tests, les données dendrométriques ne suivent pas la loi normale. Un test d'analyse de variance (ANOVA) sur les rangs suivi d'un test HSD de Tukey ont été fait pour comparer les plantes inoculées et les plantes témoins. Pour les données des échantillons de sol qui suivent la loi normale, un test d'analyse de variance (ANOVA) à un facteur nous a permis d'évaluer l'effet de la plantation sur les paramètres physicochimiques du sol.

Chapitre III : Résultats et discussion

I. Résultats

1) Effet du précédent inoculum avec le *Rhizophagus fasciculatus* et /ou *Frankia Ccl6* sur le taux de survie et la croissance des plantes de *Melaleuca leucadendron* (L.) en milieu salé

- Le taux de survie de la plantation de *Melaleuca leucadendron* (L.)

Les résultats montrent que sur les 512 plantes de *M. leucadendron* (L.) qui ont été transplantés 58,40% ont survécu après deux ans de plantation. Le taux de survie le plus élevé a été obtenu chez les plantes qui ont comme précédent inoculum le champignon *Rhizophagus fasciculatus* avec 60,16% de plantes qui ont survécu suivi des plantes avec comme précédent inoculum *Rhizophagus fasciculatus* et *Frankia Ccl6* avec 58,59%. Par contre, le taux de survie le plus faible a été noté chez les plantes avec comme précédent inoculum la bactérie *Frankia Ccl6* avec 52,34% de plantes qui ont survécu. Cependant, comparé aux témoins qui ont un taux de survie de 57,82%, le précédent inoculum n'a pas d'effet significatif sur le taux de survie des plantes de *M. leucadendron* (L.). (Tableau 3)

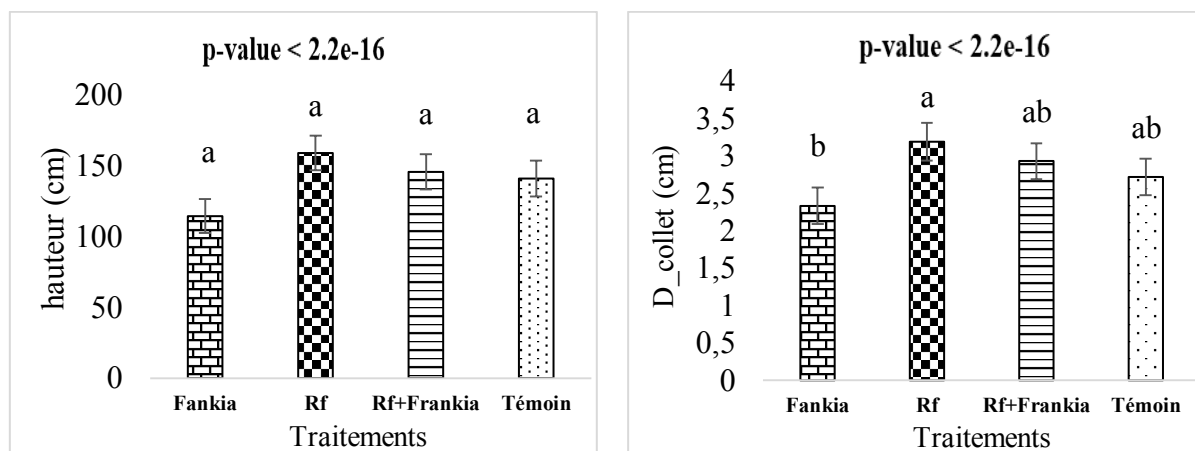
Tableau 3 : Taux de survie des plants de *M. leucadendron* (L.) après deux ans de plantation

Traitements	taux de survie (%)
Témoin	57,82
<i>Frankia</i>	52,34
<i>R. fasciculatus</i>	60,16
<i>Frankia</i> + <i>R. fasciculatus</i>	58,59
Total	58,40

- sur la hauteur et le diamètre au collet :

Les résultats obtenus ont montré qu'après deux ans de plantation, les croissances (hauteur et diamètre au collet) les plus importantes ont été obtenues chez les plantes qui ont comme précédent inoculum le champignon *Rhizophagus fasciculatus*. Par contre les croissances les plus faibles ont été notées chez les plantes avec comme précédent inoculum la bactérie *Frankia*

Ccl6. Cependant, comparés aux témoins, l'analyse de la variance montre que les résultats ne sont pas statistiquement différents au seuil de 5% (figures 8).

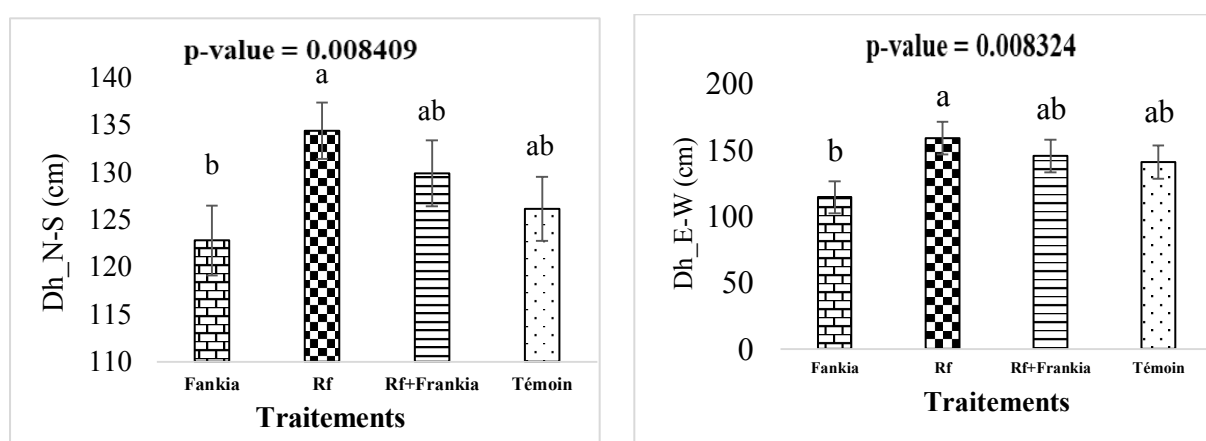


Pour chaque traitement, les histogrammes suivis par les mêmes lettres ne sont pas significativement différents au seuil de 5% selon le test Tukey-HSD.

Figure 8 : croissance en hauteur et du diamètre au collet des plantes de *M. leucadendron* après deux ans de plantation selon les traitements.

- **Sur le diamètre des houppiers :**

Après deux ans de plantation, les résultats obtenus montrent que les diamètres du houppier les plus importants ont été obtenus chez les plantes qui ont comme précédent inoculum le champignon *Rhizophagus fasciculatus* et les plus faibles chez les plantes avec comme précédent inoculum la bactérie *Frankia Ccl6*. Cependant, comparés aux témoins, l'analyse de la variance montre que les résultats ne sont pas statistiquement différents au seuil de 5 (figures 10).



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

Figure 8: croissance du diamètre du houppier des plantes de *M. leucadendron* (L.) après deux ans de plantation selon les traitements.

2) Effet de la plantation de *Melaleuca leucadendron* (L.) sur la végétation herbacée

- Inventaire floristique

Pour l'inventaire floristique, 18 espèces végétales herbacées ont été identifiées. Elles se répartissent entre 16 genres et 9 familles. Le cortège floristique sous couvert de *Melaleuca* est composé de 17 espèces parmi lesquelles 14 sont communes avec celui du hors couvert de *Melaleuca* riche de 15 espèces. Les espèces spécifiquement inventoriées sous couvert de *Melaleuca* sont *Corchorus tridens* L., *Striga sp* et *Cassia obtusifolia* (L.) et par contre *Schultesia stenophylla* Mart.var.latifolia est la seule espèce inventoriée hors couvert de *Melaleuca* (voir tableau 4).

Tableau 4: Liste des espèces herbacées présentes SC: sous couvert et HC: hors couvert de *Melaleuca* (+ : présence ; - : absence)

Familles	Genres	Espèces	SC	HC	
<i>Poaceae</i>	<i>Andropogon</i>	<i>Andropogon pinguipes</i> (Stapf)	+	+	
	<i>Dactyloctenium</i>	<i>Dactyloctenium aegyptium</i> (L.)Willd	+	+	
	<i>Chloris</i>	<i>Chloris barbata</i> (L.) Sw.	+	+	
	<i>Eragrostis</i>		<i>Eragrostis tenella</i> (L.) Beauv.	+	+
			<i>Eragrostis tremula</i> Hochst. Ex Steud.	+	+
	<i>Paspalum</i>	<i>Paspalum vaginatum</i> (L.)	+	+	
	<i>Sporobolus</i>	<i>Sporobolus robustus</i> Kunth	+	+	
<i>Ctenium</i>	<i>Ctenium elegans</i> Kunth	+	+		
<i>Malvaceae</i>	<i>Corchorus</i>	<i>Corchorus tridens</i> L.	+	-	
	<i>Sida</i>	<i>Sida alba</i> L.	+	+	
<i>Asteraceae</i>	<i>Sphaeranthus</i>	<i>Sphaeranthus senegalensis</i> DC.	+	+	
<i>Acanthaceae</i>	<i>Hygrophila</i>	<i>Hygrophila senegalensis</i> (Nees) T.A	+	+	
<i>Rubiaceae</i>	<i>Spermacoce</i>	<i>Spermacoce verticillata</i> L.	+	+	
		<i>Spermacoce radiata</i> (DC.)	+	+	
<i>Amaranthaceae</i>	<i>Phyloxerus</i>	<i>phyloxerus vermicularis</i> (L.)	+	+	
<i>Gentianaceae</i>	<i>Schultesia</i>	<i>Schultesia stenophylla</i> Mart.var.latifolia	-	+	
<i>Orobanchaceae</i>	<i>Striga</i>	<i>Striga sp</i>	+	-	

<i>Fabaceae</i>	<i>Cassia</i>	<i>Cassia obtusifolia</i> (L.)	+	-
-----------------	---------------	--------------------------------	---	---

- **Fréquence de présence**

La variation de la fréquence de présence des herbacées dans les différents relevés sous couvert *Melaleuca* a montré qu'*Eragrostis tenella* (L.) Beauv., *Hygrophila senegalensis* (Nees) T.A et *Spermacoce verticillata* (L.) sont les plus fréquentes (100 % de présence), suivie *Ctenium elegans* Kunth (70,83 %), *Paspalum vaginatum* (L.) (66,67 %), *Chloris barbata* (L.) Sw. (58,33 %) et *Andropogon pinguipes* (Stapf) (50%). Par contre, hors couvert *Melaleuca* l'espèce *Paspalum vaginatum* (L.) est la plus fréquente avec 83,33 % de présence suivi des espèces *Hygrophila senegalensis* (Nees) T.A, *Eragrostis tenella* (L.) Beauv. et *Spermacoce verticillata* L. (75 % de présence). Hormis ces espèces dominantes, *Ctenium elegans* Kunth et *Sphaeranthus senegalensis* DC. présentent des taux de fréquences importantes avec des valeurs respectives de 58,33 % et 41,66 %. Par contre, les autres espèces sont les moins fréquentes avec moins de 16,67% de présence (Tableau 5).

Tableau 5 : Fréquence de présence des espèces sous couvert et hors couvert de *Melaleuca leucadenron* (L.)

Espèces	Fréquence de présence (%)	
	S C	H C
<i>Andropogon pinguipes</i> (Stapf)	50	4,16
<i>Dactyloctenium aegyptium</i> (L.)Willd	33, 33	4,16
<i>Chloris barbata</i> (L.) Sw.	58,33	8,33
<i>Eragrostis tenella</i> (L.) Beauv.	100	75
<i>Eragrostis tremula</i> Hochst. Ex Steud.	16,67	8,33
<i>Paspalum vaginatum</i> L.	66,67	83,33
<i>Sporobolus robustus</i> Kunth	12,5	12,5
<i>Ctenium elegans</i> Kunth	70,83	58,33
<i>Corchorus tridens</i> L.	4,16	-
<i>Sida alba</i> L.	0,52	8,33
<i>Sphaeranthus senegalensis</i> DC.	33,33	41,66

<i>Hygrophila senegalensis</i> (Nees) T.A	100	75
<i>Spermacoce verticillata</i> L.	100	75
<i>Spermacoce radiata</i> (DC.)	4,16	8,33
<i>phyloxerus vermicularis</i> (L.)	12,5	12,5
<i>Schultesia stenophylla</i> Mart.var.latifolia	-	4,16
<i>Striga sp</i>	4,16	-
<i>Cassia obtusifolia</i> (L.)	8,33	-

- **Contribution spécifique présence sous couvert et hors couvert de *Melaleuca***

La contribution spécifique présence traduit la participation de l'espèce dans l'occupation spatiale de la plantation. Les espèces ayant le plus participées dans l'occupation spatiale sous couvert de *Melaleuca* sont *Eragrostis tenella* (L.) Beauv. (14,37%), *Hygrophila senegalensis* (Nees) T.A (14,37%) et *Spermacoce verticillata* L. (14,37%). Hormis les trois espèces dominantes, une participation importante a été notée chez les espèces *Ctenium elegans* Kunth (10,18%), *Paspalum vaginatum* L. (9,58%), *Chloris barbata* (L.) Sw. (8,33%) et *Andropogon pinguipes* (Stapf) (7,18%). Par contre, des occupations spatiales plus importantes hors couvert de *Melaleuca* ont été notées avec les espèces *Paspalum vaginatum* (L.) (17,39 %) suivi de *Hygrophila senegalensis* (Nees) T.A (15,65%), *Eragrostis tenella* (L.) Beauv. (15,65%), *Spermacoce verticillata* L. (15,65%) puis *Ctenium elegans* Kunth (12,17%), et *Sphaeranthus senegalensis* DC. (8,69%). Les autres espèces sont les moins fréquentes et leur participation dans l'occupation spatiale est inférieure à 5%. Cependant, il est important de noter qu'il existe des espèces ayant des contributions spécifiques inférieures à 1% (*Cassia obtusifolia* (L.), *Corchorus tridens* (L.) et *Schultesia stenophylla* Mart.var.latifolia) ; ceux sont des espèces rencontrées une ou deux fois dans le site d'étude ; elles sont dites : « espèces rares » (Tableau 6).

Tableau 6: Contribution spécifique présence (C.S.P) des espèces sous couvert et hors couvert de *Melaleuca leucadenron* (L.)

Espèces	C. S. P. (%)	
	S C	H C
<i>Andropogon pinguipes</i> (Stapf)	7,18	0,87
<i>Dactyloctenium aegyptium</i> (L.)Willd	4,79	0,87
<i>Chloris barbata</i> (L.) Sw.	8,33	1,74
<i>Eragrostis tenella</i> (L.) Beauv.	14,37	15,65
<i>Eragrostis tremula</i> Hochst. Ex Steud.	2,39	1,74
<i>Paspalum vaginatum</i> L.	9,58	17,40
<i>Sporobolus robustus</i> Kunth	1,80	2,61
<i>Ctenium elegans</i> Kunth	10,17	12,17
<i>Corchorus tridens</i> L.	0,60	-
<i>Sida alba</i> L.	2,99	1,74
<i>Sphaeranthus senegalensis</i> DC.	4,79	8,69
<i>Hygrophila senegalensis</i> (Nees) T.A	14,37	15,65
<i>Spermacoce verticillata</i> L.	14,37	15,65
<i>Spermacoce radiata</i> (DC.)	0,60	1,74
<i>phyloxerus vermicularis</i> (L.)	1,80	2,61
<i>Schultesia stenophylla</i> Mart.var.latifolia	-	0,87
<i>Striga sp</i>	0,60	-
<i>Cassia obtusifolia</i> (L.)	1,27	-
Total (%)	100	100

- Les indices de diversité

Les indices de diversité donnent des informations sur la structure du peuplement et sur la façon dont les individus y sont répartis entre les diverses espèces (Akpo et al., 2003). Les degrés de l'homogénéité spatiale et interne des espèces ont été appréciés sous couvert et hors couvert de

Melaleuca respectivement par l'indice de diversité de Shannon et l'indice d'équitabilité de Piélou. Le recouvrement moyen total du tapis herbacé sous couvert de *Melaleuca* est égal à 78,33% et celui du hors couvert correspond à 52,16%. Sous couvert de *Melaleuca*, la richesse spécifique est de 17 espèces et les indices de diversité de Shannon (H) et d'équitabilité de Piélou (E) sont respectivement de 2,85 bits et 0,7. Par contre, hors couvert de *Melaleuca*, la richesse spécifique est égale à 15 espèces, l'indice de Shannon est de 2,55 bits et celle d'équitabilité de Piélou est de 0,65 (Tableau 7).

Tableau 7: Variation de la diversité floristique sous couvert et hors couvert de *Melaleuca*

	Sous couvert	Hors couvert
Recouvrement moyen total (%)	78,33	52,16
Richesse spécifique	17	15
Indice de Shannon	2,85	2,55
Indice d'Equitabilité de Piélou	0,70	0,65

3) Impact de la plantation de *Melaleuca leucadendron* (L.) sur les caractéristiques physicochimiques du sol

L'analyse des résultats des échantillons ont montré que les sols du site sont sableux et acides ($\text{pH} < 5$) et qu'il n'y a pas de différence significative entre les paramètres mesurés au niveau du sous couvert et du hors couvert. En ce qui concerne la conductivité électrique (CE 1/5), les valeurs semblent plus élevées au niveau du sous couvert et celle obtenue en milieu découvert est inférieur à 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Cependant, l'analyse de la variance montre qu'il n'y a aucune différence significative entre les valeurs de la CE des échantillons du sous couvert et ceux du hors couvert. S'agissant du niveau du sol en matière organique, en carbone total, en azote total et en phosphore assimilable les taux sont faibles et ne présentent pas de différence significative au niveau des deux milieux. Il en est de même pour le rapport carbone azote entre ces deux milieux. Pour les bases échangeables (excepté le potassium K^+ qui est plus important au niveau du sous couvert), leur somme (S), la capacité d'échange cationique (CEC) et la saturation, l'analyse de la variance ne montre aucune différence significative entre les échantillons du sous couvert et ceux du hors couvert (tableau 8).

Tableau8 : Impact de la plantation de *Melaleuca leucadendron* (L.) sur les caractéristiques physicochimiques du sol

	Granulométrie			pH (1/2,5)	CE (1/5)	P/ass	C/t	N/t	MO	C/N	Bases échangeables + CEC (méq/100g)						
	Argile (%)	Limon (%)	Sable (%)	Eau	μS/cm	Ppm	(%)	(%)	(%)		Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	S	CEC	Saturation
Hors couvert	4,25	5,37	90,38	4.74 a	446.45 a	1.46 a	0.77 a	0.05 a	0.44 a	14.40 a	1.27 a	1.01 a	0.08 b	1.34 a	3.71 a	2.34 a	saturé
Sous couvert	4,07	4,60	91,33	4.60 a	827.95 a	1.13 a	0.62 a	0.05 a	0.36 a	12.25 a	0.85 a	1.13 a	0.21 a	1.50 a	3.71 a	1.98 a	saturé

Les valeurs pour chaque colonne suivies par une même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de 5% (Test de Fisher).

II. Discussion

Les résultats obtenus montrent que le *Melaleuca leucadendron* (L.) est tolérant à la salinité car 58,40% des plantes ont survécu après deux ans de plantation. Il est important de rappeler d'une part que les plantes de *M. leucadendron* (L.) n'ont pas été inoculées. L'inoculation microbienne a été faite sur des plantes de *Casuarina sp* en pépinière pendant 4 mois et transplantées sur sol salé en septembre 2016 ; après avoir enregistré une forte mortalité, des plantes de *M. leucadendron* ont été transplantées sur le même site en août 2017 dans le but d'évaluer l'impact du précédent inoculum. D'autre part, le *M. leucadendron* ne s'associe pas aux *Frankia* car ils ne sont pas des plantes actinorhiziennes. Cependant, les *Frankia* sont capables de fixer l'azote à l'état libre (Sy, 2006). Cependant, le précédent inoculum avec le champignon mycorhizien à arbuscule *R. fasciculatus* et/ou la bactérie *Frankia* n'a aucun effet significatif sur le taux de survie et la croissance (hauteur, diamètre au collet et diamètre houppiers) des plantes. Cette absence d'effet significatif de l'inoculation microbienne particulièrement avec les CMA pourrait être due à une incompatibilité ou à une inefficacité des microorganismes avec les plantes de *M. leucadendron* (L.) ou encore l'absence de ces souches dans le sol. En effet, l'absence d'effet de l'inoculation de la bactérie *Frankia* est due au fait que les *Melaleuca* ne sont pas des plantes actinorhiziennes donc ne s'associent pas avec les bactéries du genre *Frankia*. Par ailleurs, les travaux de Faye (2020) viennent de montrer que l'inoculation microbienne n'a pas d'effet positif significatif sur la fréquence et l'intensité de mycorhization des plantes de *M. leucadendron* (L.). Ce qui explique que l'absence d'effet positif avec *R. fasciculatus* pourrait être liée à un problème de compatibilité ou d'inefficacité vis-à-vis de la plante hôte ou encore leur absence dans le milieu. Ceci pourrait être liée à l'adaptabilité de la souche aux conditions pédologiques et/ou climatiques telles que la salinité, la sécheresse ou la température (Sheng *et al.*, 2008) ou à sa compétitivité avec les souches indigènes du milieu (Manzo Laminou *et al.*, 2009). En effet, les hyphes fongiques sont très sensibles à la salinité et une forte présence de sel entraîne une modification de leur structure, une diminution du taux de leurs structures actives (Diagne, 2016), de leur propagation (Soumaré *et al.*, 2008) et une perte de leur viabilité qui peut s'avérer critique pour la survie, la réussite et l'installation de la mycorhization. De ce fait, leur efficacité dans le prélèvement de l'eau et des éléments nutritifs permettant d'améliorer la croissance des plantes pourrait être réduite. De plus, Bâ *et al.*, (1996) suggèrent que l'inoculation n'est bénéfique que si les souches utilisées sont plus compétitives que les souches existantes dans le sol (Bâ *et al.*, 1996). Et cette compétitivité varie en fonction

de la plante hôte, qui, bien que peu spécifique, réalise des relations préférentielles avec certaines souches de CMA (Sieverding, 1990). Toutefois, de nombreuses études ont montré l'effet positif de l'inoculation des microorganismes sur la croissance et le taux de survie des plantes en condition saline (Diagne, 2011; Djighaly, 2014, 2019).

Nos résultats rejoignent ceux de Ndong (2018) qui montrent une absence d'effet significative du précédent inoculum avec le champignon mycorhizien à arbuscule *R. fasciculatus* et/ou la bactérie *Frankia* chez des *Melaleuca* dans les terres salées.

La diversité floristique a été appréciée à travers les indices de Shannon et d'équitabilité de Piélou. Nos résultats ont montré que l'indice de diversité de Shannon qui associe richesse et fréquence des espèces et celui d'équitabilité de Piélou sont plus élevés dans les parcelles sous couvert (respectivement 2,85 bits et 0,70) comparées aux parcelles hors couvert de *Melaleuca* (respectivement 2,55 bits et 0,65). Ainsi, la diversité est plus importante au niveau des parcelles sous couvert de *Melaleuca*. Selon Akpo *et al.*, (2000), une plus grande diversité implique une plus grande égalité des contributions individuelles et inversement, une diversité plus faible signifie une faible régularité de la répartition des individus. De même le recouvrement global du tapis herbacé sous couvert (78,33%) est nettement plus important que celui du hors couvert (52,16%) *Melaleuca*. Cela s'explique par le fait que des espèces ont été plus fréquentes et abondantes au niveau des parcelles du sous couvert de *Melaleuca*. Cette différence pourrait être liée aux effets bénéfiques des arbres de *Melaleuca leucadendron* (L.) qui sont des plantes pionnières et qui créent un microclimat favorable à l'installation de la végétation herbacée. En effet, la présence de houppier permet de mettre à disposition une matière organique qui améliore la qualité du sol et la disponibilité des éléments minéraux rendant cette partie plus fertile donc plus favorable au développement des herbacées (Diallo *et al.*, 2006). Nos résultats sont en accord avec les travaux de Djighaly, (2019) et Diallo *et al.*, (2015) qui ont montré l'effet positif de l'arbre sur la végétation herbacée respectivement en milieu salin et en milieu aride. En effet, Diallo *et al.*, (2015) suggèrent que sous les plantes ligneuses, l'ombre causée par les branches permet aux herbacées de boucler leur cycle de vie et de maintenir la pérennité de l'espèce. Ce qui entraîne la diversité spécifique élevée sous couvert de certaines plantes ligneuses.

Il ressort aussi de ces résultats que *Spermacoce verticillata* L., *Eragrostis tenella* (L.) Beauv. et *Hygrophila senegalensis* (Nees) T.A sont les espèces dominantes dans la plantation de *Melaleuca*. Alors que hors couvert de *Melaleuca*, les espèces *Hygrophila senegalensis* (Nees) T.A et *Spermacoce verticillata* L. sont dominantes (voir annexe 3). Ainsi la végétation caractéristique du site semble étroitement liée au type de sol, à la position topographique et à l'influence de l'arbre. D'après Akpo *et al.*, (2000), arbre et topographie s'associent pour créer

une hétérogénéité de plus en plus grande du milieu qui gère la répartition de la végétation herbacée sous et hors couvert des arbres. Cependant, l'absence de clôture au niveau de la parcelle fait exposer les espèces herbacées à la pression du bétail qui vient brouter les herbes sous couvert en profitant de l'ombrage des branches de ces plantes (Akpo et Grouzis, 2004). Ceci pourrait entraîner une diminution de la diversité et de la contribution des espèces à l'intérieur de la plantation de *Melaleuca leucadendron* (L.).

Concernant l'impact de la plantation sur les propriétés physicochimiques du sol, les résultats obtenus à travers cet étude montrent que les variations du pH, de la conductivité électrique (CE) et du sodium échangeable sous et hors houppiers ne font pas ressortir de façon précise l'influence de *Melaleuca leucadendron* (L.) sur le sol. Dans cette étude, même si les résultats de la CE ne sont pas statistiquement différents, la salinité s'est révélée plus sévère au niveau du sous houppier et la conductivité électrique (CE) est inférieure à la norme (4 dS /m) au niveau du hors houppier. Ceci pourrait être lié à la topographie et à l'homogénéité du milieu. En effet, les études de Djighaly (2019) révèlent que la variabilité de la concentration en sel du milieu dépendait des différents points de la parcelle, de la saison mais aussi en fonction de la pente (Djighaly, 2019). Par ailleurs, la salinité plus importante dans le sous couvert pourrait être expliquée par les apports de la pluie (égouttement) en éléments sodium, magnésium et potassium sous couvert forestier qui sont toujours supérieurs à ceux de la pluie incidente (Boubacar *et al.*, 2019).

Pour ce qui est du taux de la matière organique, il est très faible et n'est pas significativement différent entre le sous couvert et le hors couvert. Le faible taux sous houppier pourrait être dû à un faible taux de décomposition de la litière de *Melaleuca leucadendron* (L.) qui serait lié à son tour soit à la lenteur de décomposition de la litière de cette espèce qui nécessite beaucoup de temps soit à une faible activité microbienne. En effet des études portant sur la décomposition et incorporation de la matière organique du sol de la litière d'*Eucalyptus camaldulensis* et de quelques autres essences ont montré que la décomposition de la litière de deux espèces du genre *Melaleuca* (*viridiflora* et *quinquinerva*) était relativement lente (respectivement des taux de 20 % et 15 % pendant 30 jours) (Bernhard Reversat, 1981). En outre, ceci peut être justifié par le rapport C/N qui permet de juger de l'aptitude de la matière organique à se décomposer plus ou moins rapidement dans le sol et qui est un bon paramètre pour apprécier l'activité biologique du sol (N'goran, 2018). Ce rapport supérieur à 10 dans les deux milieux indique une activité biologique faible et un processus de minéralisation lent (Soltner, 2000). Ceci serait dû à la salinité du sol qui réduit l'activité microbienne. Nos résultats sont contraire à ceux de N'goran

(2018) qui révèlent que l'arbre favorise une augmentation de la matière organique et sa décomposition en éléments minéraux stables.

En ce qui concerne les teneurs en carbone, azote et phosphore assimilable du sous houppiers, elles ne sont pas significativement différentes de celles du hors houppiers. L'abondance de ces éléments dépend de la quantité de matière organique minéralisée du sol et de leur utilisation liée à l'activité des microorganismes et des plantes. Par ailleurs, beaucoup d'études ont permis de constater que les sols se trouvant sous le couvert des arbres sont plus riches en éléments minéraux que les sols nus (N'goran, 2018 ; Abdou *et al.*, 2014).

S'agissant des bases échangeables, les résultats ne sont pas significativement différents entre le sous couvert et le hors couvert exceptés le potassium. Ce dernier supérieur à l'intérieur de la plantation pourrait être lié à l'effet des exsudats racinaires dans la rhizosphère. En effet, ces exsudats contiennent des acides organiques qui favorisent la libération du potassium dans le sol (Wang *et al.*, 2011). En outre, la présence des cations Ca^{2+} , Mg^{2+} ou Na^+ dans la rhizosphère augmente la disponibilité de potassium du sol non seulement par leur effet d'échange sur le potassium échangeable initial, mais aussi par leur effet positif sur la libération du potassium non échangeable initial (Wang *et al.*, 2011). Pour la somme des bases échangeables, elle reste faible et indifférente au niveau des deux milieux. Ce faible niveau de la somme des bases pourrait être lié d'une part à la forte acidité du sol et d'autre part, aux faibles teneurs en argiles et matière organique qui constituent les principaux éléments minéraux qui adsorbent les bases (Boubacar *et al.*, 2019). Quant à la capacité d'échange cationique (CEC), les résultats ne présentent pas aussi de valeurs statistiquement différentes entre les deux milieux. Les taux de matière organique faibles et statistiquement indifférents au niveau du sous et hors couvert pourrait expliquer ces résultats car la CEC est corrélée au degré de décomposition de la matière organique (Euroconsult, 1989). Ainsi, le taux de saturation (rapport de la somme des bases échangeables sur la CEC) déterminé par ces deux paramètres reste indifférent entre les deux milieux.

Nos résultats sont contraires à ceux obtenus par Abdou *et al.*, (2014) qui montrent que la somme des bases échangeables et la CEC étaient plus élevées dans le sous couvert qu'en milieu découvert (Abdou *et al.*, 2014).

Conclusion et perspectives

Cette étude s'inscrit dans le cadre de contribuer à la valorisation agrosylvopastorale d'écosystèmes dégradés par le sel au Sénégal. Elle avait pour objectif de caractériser une plantation de *Melaleuca leucadendron* (L.) de deux ans sur sol salé précédemment inoculé avec la souche de *Frankia Cc16* et /ou le champignon mycorhizien à arbuscule (CMA) *Rhizophagus fasciculatus* dans le terroir de Ndiémou (Fatick). Les résultats obtenus ont montré que les plantes de *Melaleuca leucadendron* (L.) peuvent se développer en milieu salé et l'inoculation microbienne précédente n'a pas d'effet positif significatif sur le taux de survie et la croissance des plantes de *M. leucadendron* (L.). Il en ressort aussi de ces résultats que d'une part la plantation de *Melaleuca leucadendron* (L.) de deux ans a un effet positif sur la diversité floristique du site et d'autre part elle n'a pas d'effet sur les paramètres physicochimiques du sol (excepté le taux de potassium). Le résultat de cette étude suggère que les plantes de *Melaleuca leucadendron* (L.) peuvent être utilisées dans les programmes de réhabilitation des terres dégradées par le sel au Sénégal et qu'une inoculation en pépinière serait nécessaire pour améliorer le choc de transplantation et le taux de survie des plantes.

En perspective, il serait intéressant de :

- Suivre l'étude pendant au moins 5 ans afin de confirmer ces résultats, voir l'impact de la plantation à 5 ans et voir plus sur l'ensemble des paramètres étudiés ;
- étudier les mécanismes mises en place dans la tolérance au sel des plantes de *Melaleuca leucadendron* (L.) ;
- Etudier la diversité des CMA indigènes associés au *Melaleuca leucadendron* (L.) sur sol salé ;
- Etudier l'efficacité des souches de CMA introduites vis-à-vis des plantes de *Melaleuca* et/ou des conditions pédologiques ;
- Comparer la tolérance au sel de la souche introduite et des souches indigènes ;
- Faire un test sous serre en inoculant les plantes de *Melaleuca leucadendron* (L.) en pépinière avec des souches efficaces avant de les transplanter sur sol salé et
- Faire l'échantillonnage de sol avant et après la saison des pluies et à des horizons différents

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abdou M., Alzouma Mayaki Z., Kadri A., Ambouta J.-M., Dan Lamso N. (2014)** – Effet de l'arbre *Acacia senegal* sur la fertilité des sols de gomméraires au Niger. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, **7**, 2328.
- Adjanooun A., Baba-moussa B.-Mol.S., Dagbenonbakin G., Saidou A., Toukourou Fatiou (2017)** – Utilisation des microorganismes du sol pour accroître la productivité agricole. Bibliothèque Nationale (BN) du Bénin.
- Aini N. (2012)** – Ecophysiological responses of *Melaleuca* species to dual stresses of water logging and salinity. *International Journal of Plant Physiology and Biochemistry*, **4**.
- Akpo L.-É., Grouzis M. (2004)** – Interactions arbre/herbe en bioclimat semi-aride: influence de la pâture. *Sécheresse*, **15**, 253–61.
- Akpo L.-É., Grouzis M., Bada F., Pontanier R., Floret C. (2000)** – Effet du couvert ligneux sur la structure de la végétation herbacée de jachères soudaniennes. *Science et changements planétaires / Sécheresse*, **10**, 253–261.
- Akpo L.-É., RADA F. Grouzis M. (2003)** – Diversité de la végétation herbacée sous arbres : variation selon l'espèce ligneuse en milieu sahélien. *Candollea* **58**, 515- 530.
- Akram M.S., Athar H.R., Ashraf M. (2007)** – Improving growth and yield of sunflower (*Helianthus annuus* L.) by foliar application of potassium hydroxide (KOH) under salt stress. *Pakistan Journal of Botany*, **39**, 769–776.
- Anonyme (2012)** – Projet Partenariat Multi-acteurs pour l'Adaptation des Populations Vulnérables à la Salinisation des sols induite par les Changements Climatiques au Sénégal. Institut Sénégalais de Recherches Agricoles, Centre National de Recherches Forestières.
- Anonyme (2013)** – Agriculture espace rural Sénégal : Lutte contre la salinisation des terres.
- Anonyme (2016)** – Zoom sur les bactéries fixatrices d'azote. *Biofertilisants.fr*.
- Ashraf M., Hasnain S., Berge O., Mahmood T. (2004)** – Inoculating wheat seedlings with exopolysaccharide-producing bacteria restricts sodium uptake and stimulates plant growth under salt stress. *Biology and Fertility of soils*, **40**, 157–162.
- Attabi khadija, taiba B. (2019)** – Effet de la salinité sur les caractères morpho – physiologiques de quelques variétés d'haricot (*Phaseolus vulgaris* L). Université Djilali Bounaama de Khemis Miliana.
- Azevedo Neto A.D. de, Prisco J.T., Eneas-Filho J., Abreu C.E.B. de, Gomes-Filho E. (2006)** – Effect of salt stress on antioxidative enzymes and lipid peroxidation in leaves and roots of salt-tolerant and salt-sensitive maize genotypes. *Environmental and experimental botany*.
- Azzeme A.M., Abdullah S.N.A. (2019)** – Adaptive Mechanisms of Plants Against Salt Stress and Salt Shock. In: *Salt Stress, Microbes, and Plant Interactions: Mechanisms and Molecular Approaches* (ed Akhtar MS), pp. 27–47. Springer Singapore, Singapore.
- Bâ A.M., Dalpé Y., Guissou T. (1996)** – Les Glomales d'*Acacia holosericea* et d'*Acacia mangium*. *Bois & Forêts des Tropiques*, **250**, 5–18.

- Balzergue C. (2012)** – Régulation de la symbiose endomycorhizienne par le phosphate. PhD thesis. Université Paul Sabatier - Toulouse III.
- Bécard G., Kosuta S., Tamasloukht M., Séjalon-Delmas N., Roux C. (2004)** – Partner communication in the arbuscular mycorrhizal interaction. *Canadian Journal of Botany*, **82**, 1186–1197.
- Bensidhoum L., Nabti E. (2019)** – Plant Growth-Promoting Bacteria for Improving Crops Under Saline Conditions. In: *Microorganisms in Saline Environments: Strategies and Functions* (eds Giri B, Varma A), pp. 329–352. Springer International Publishing, Cham.
- Berhaut J (1967)** – Flora of Senegal. Flora of Senegal
- Bhardwaj D., Ansari M.W., Sahoo R.K., Tuteja N. (2014)** – Biofertilizers function as key player in sustainable agriculture by improving soil fertility, plant tolerance and crop productivity. *Microbial Cell Factories*, **13**, 66.
- Boivin S., Ait Lahmidi N., Sherlock D., Bonhomme M., Dijon D., Heulin-Gotty K., Le-Queré A., Pervent M., Tauzin M., Carlsson G., Jensen E., Journet E., Lopez-Bellido R., Seidenglanz M., Marinkovic J., Colella S., Brunel B., Young P., Lepetit M. (2019)** – Host-specific competitiveness to form nodules in *Rhizobium leguminosarum* symbiovar *viciae*. *New Phytologist*, **40**.
- Bonfante P., Genre A. (2010)** – Mechanisms underlying beneficial plant–fungus interactions in mycorrhizal symbiosis. *Nature communications*, **1**, 1–11.
- Boubacar I., Idrissa S., Yacouba B., Ambouta Karimou J.M. (2019)** – Effet de *Balanites aegyptiaca* sur le niveau de fertilité chimique d'un sol de terrasse du fleuve Niger. *Journal of Applied Biosciences*, **137**, 13940.
- Boukourt (2016)** – Effets de la salinité sur les caractéristiques physico-chimiques d'un sol du périmètre du Bas Cheliff et sur le comportement écophysologique de la courgette (Cucurbitapepo).
- Braun-Blanquet J (1928)** – Pflanzensoziologie. Grundzüge der Vegetationskunde. *Biologische Studienbücher* 7. 1. Ed. Berlin. x + 330 pp
- Broadhurst L., Byrne M., Craven L., Lepschi B. (2005)** – Genetic congruence with new species boundaries in the *Melaleuca uncinata* complex (*Myrtaceae*). *Australian Journal of Botany*, **52**, 729–737.
- Brophy J.J., Craven L.A., Doran J.C. (2013)** – *Melaleucas*: their botany, essential oils and uses. Brophy, J. J.; Craven, L. A.; Doran, J. C.
- Bulgarelli D., Schlaeppi K., Spaepen S., van Themaat E.V.L., Schulze-Lefert P. (2013)** – Structure and Functions of the Bacterial Microbiota of Plants. *Annual Review of Plant Biology*, **64**, 807–838.
- Cacciari I., Mattia E.D., Quatrini P., Moscatelli M.C., Grego S., Lippi D., paolis M.R.D. (2013)** – Réponses adaptatives des isolats de *Rhizobium* aux stress. In: *Un arbre au désert : Acacia raddiana* Synthèses. (eds Grouzis M, Le Floc'h É), pp. 183–200. IRD Éditions, Marseille.
- Calvet R. (2003)** – Le Sol-Propriétés et fonctions-Tome 2–Phénomènes physiques et chimiques–Applications agronomiques et environnementales. *France agricole*.

- Carter J.L., Colmer T.D., Veneklaas E.J. (2006)** – Variable tolerance of wetland tree species to combined salinity and water logging is related to regulation of ion uptake and production of organic solutes. *New Phytologist*, **169**, 123–134.
- Chabert G. (2014)** – *Myrtacées* et aromathérapie. !!UNIVERSITÉ JOSEPH FOURIER FACULTÉ DE PHARMACIE DE GRENOBLE.
- Chakdar H., Borse D.N., Verma S., Choudhary P., Das S. (2019)** – Microbial Management of Crop Salinity Stress: Mechanisms, Applications, and Prospects. In: *Salt Stress, Microbes, and Plant Interactions: Mechanisms and Molecular Approaches*, p. 25. Mohd Sayeed Akhtar, Shahjahanpur, Uttar Pradesh, India.
- Chakraborty U., Roy S., Chakraborty B. (2019)** – Microorganisms Aiding Existence and Efficiency of Plants in Saline Environment: What We Know and What to Expect. In: *Microorganisms in Saline Environments: Strategies and Functions* (eds Giri B, Varma A), pp. 211–235. Springer International Publishing, Cham.
- Chatterjee P., Samaddar S., Niinemets Ü., Sa T.-M. (2018)** – *Brevibacterium linens* RS16 confers salt tolerance to *Oryza sativa* genotypes by regulating antioxidant defense and H⁺ ATPase activity. *Microbiological research*, **215**, 89–101.
- Chen X., Bao H., Guo J., Jia W., Li Y. (2015)** – Over expression of *SeNHXI* improves both salt tolerance and disease resistance in tobacco. *Plant Signaling & Behavior*, **10**, e993240.
- Chen L., Liu Y., Wu G., Zhang N., Shen Q., Zhang R. (2017)** – Beneficial rhizobacterium *Bacillus amyloliquefaciens* SQR9 induces plant salt tolerance through spermidine production. *Molecular Plant-Microbe Interactions*, **30**, 423–432.
- Chodak M., Gołębiewski M., Morawska-Płoskonka J., Kuduk K., Niklińska M. (2015)** – Soil chemical properties affect the reaction of forest soil bacteria to drought and rewetting stress. *Annals of microbiology*, **65**, 1627–1637.
- Choudhary O.P., Kharche V.K. (2018)** – Soil Salinity and Sodicyty. *SOIL SCIENCE*, 33.
- Chun S.C., Paramasivan M., Chandrasekaran M. (2018)** – Proline Accumulation Influenced by Osmotic Stress in Arbuscular Mycorrhizal Symbiotic Plants. *Frontiers in Microbiology*, **9**, 2525.
- Cotin-Galvan L. (2014)** – Relation plante-hôte / *Frankia* dans les symbioses actinorhiziennes: cas particulier des souches non-isolables capables de sporuler in-planta. L'UNIVERSITE DE LYON.
- CSE/LADA L.D. (2003)** – L'évaluation de la dégradation des terres au Sénégal. *Rapport préliminaire*, 59.
- Delaunay V. (2014)** – La situation démographique dans l'observatoire de Niakhar 1963-2014. NIAKHAR SENEGAL.
- Devi N.L., Yadav I.C., Raha P., Shihua Q., Dan Y. (2015)** – Spatial distribution, source apportionment and ecological risk assessment of residual organochlorine pesticides (OCPs) in the Himalayas. *Environmental science and pollution research*, **22**, 20154–20166.

- Diagne N. (2011)** – Diversité, fonctionnement et incidence sur la symbiose actinorhizienne des champignons mycorrhiziens associés au *Casuarina equisetifolia* dans leur zone endémique et dans leur zone d'introduction. , 221.
- Diagne N. (2016)** – Optimisation des couples *Casuarina*/champignons mycorrhiziens arbusculaires/bactéries fixatrices d'azote pour la valorisation agro-sylvo-pastorale des écosystèmes dégradés par le sel. ISRA.
- Diagne N, Djighaly PI, Ngom M, Prodjimoto H, NGOM D, Hocher V, Fall D, Diouf D Nambiar-Veetil M, Sy MO, Ndoye I, Franche C, Bogusz D, Laplaze L (2014)** – Rehabilitation of saline lands using selected salt-tolerant *Casuarina*-microorganisms combinations. Proceedings of 5th International *Casuarina* workshop Chennai India 3-7 February 2014.
- Diallo M.-D., Duponnois R., Guisse A., Sall S., Chotte J.-L., Thioulouse J. (2006)** – Biological effects of native and exotic plant residues on plant growth, microbial biomass and N availability under controlled conditions. *European Journal of Soil Biology*, **42**, 238–246.
- Diallo M.D., Saleh M.M., Bassene C., Wood S.A., Diop A., Guisse A. (2015)** – Influence de la litière foliaire de cinq espèces végétales tropicales sur la diversité floristique des herbacées dans la zone du Ferlo (Senegal). *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, **9**, 803–814.
- Diedhiou M.A.A., Faye E., Ngom D., Fall S. (2018)** – Caractérisation De La Flore Et De La Végétation Ligneuse Des Terroirs Villageois De Keur Birame (Kaffrine) Et Saré Yorobana (Kolda) Au Sénégal. *European Scientific Journal, ESJ*, **14**, 391.
- Diouf M. (2009)** – Le sel dans le Sine : sites de Ndiemou, Soum et Palmarin (Sénégal), techniques d'exploitation et croyances. Université cheikh Anta Diop de Dakar, senegal.
- Djego J., Gibigaye M., Tente B., Sinsin B. (2012)** – Analyse écologique et structurale de la forêt communautaire de Kaodji au Bénin. *International journal of biological and chemical sciences*
- Djighaly P.I. (2014)** – Impact des champignons mycorrhiziens arbusculaires sur la tolérance au sel de *Casuarina equisetifolia* L. et *Casuarina glauca* L. sous ombrière. , **70**.
- Djighaly pape I. (2019)** – Optimisation de l'association *Casuarina*/ champignons mycorrhiziens à arbuscules et/ou bactéries fixatrices d'azote pour la réhabilitation de terres salines au Sénégal.
- Djighaly P.I., Diagne N., Ngom M., Ngom D., Hocher V., Fall D., Diouf D., Laplaze L., Svistoonoff S., Champion A. (2018)** – Selection of arbuscular mycorrhizal fungal strains to improve *Casuarina equisetifolia* L. and *Casuarina glauca* Sieb. Tolerance to salinity. *Annals of Forest Science*, **75**, 72.
- Doran J.C., Gunn B.V. (1995)** – Information sur les ressources génétiques forestières No 22.
- Drigo B., Pijl A.S., Duyts H., Kielak A.M., Gamper H.A., Houtekamer M.J., Boschker H.T.S., Bodelier P.L.E., Whiteley A.S., Veen J.A. v., Kowalchuk G.A. (2010)** – Shifting carbon flow from roots into associated microbial communities in response to elevated atmospheric CO₂. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **107**, 10938–10942.

- Druege U., Franken P. (2019)** – Petunia as model for elucidating adventitious root formation and mycorrhizal symbiosis: at the nexus of physiology, genetics, microbiology and horticulture. *Physiologia Plantarum*, **165**, 58–72.
- Dubey A., Verma A.K. (2019)** – Salinity Stress-Dependent Coordination of Metabolic Networks in Relation to Salt Tolerance in Plants. In: *Microorganisms in Saline Environments: Strategies and Functions* (eds Giri B, Varma A), pp. 401–422. Springer International Publishing, Cham.
- Duponnois R., Founoune H., Masse D., Pontanier R. (2005)** – Inoculation of *Acacia holosericea* with ectomycorrhizal fungi in a semi arid site in Senegal: growth response and influences on the mycorrhizal soil infectivity after 2 years plantation. *Forest Ecology and Management*, **207**, 351–362.
- Duponnois R., Hafidi M., Ndoye I., Ramanankierana H., Bâ A. (2013)** – Généralités sur la symbiose mycorrhizienne.
- Edwards R.D., Craven L.A., Crisp M.D., Cook L.G. (2010)** – *Melaleuca* revisited: cpDNA and morphological data confirm that *Melaleuca L.* (*Myrtaceae*) is not monophyletic. *TAXON*, **59**, 744–754.
- Egamberdieva D., Berg G., Lindström K., Räsänen L.A. (2010)** – Co-inoculation of *Pseudomonas spp.* with Rhizobium improves growth and symbiotic performance of fodder galega (*Galega orientalis* Lam.). *European Journal of Soil Biology*, **46**, 269–272.
- Evelin H., Kapoor R., Giri B. (2009)** – Arbuscular mycorrhizal fungi in alleviation of salt stress: a review. *Annals of Botany*, **104**, 1263–1280.
- Fall (2016)** – 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. Thèse de doctorat en Biotechnologies Végétales et Microbiennes et Amélioration des Plantes. Université Cheikh Anta Diop de Dakar, Sénégal, 143 p
- Fann R. (2014)** – AGENCE NATIONALE DE LA STATISTIQUE ET DE LA DEMOGRAPHIE. , **118**.
- FAO (2006)** – Electronic conference on salinization: extension of salinization and strategies of prevention and rehabilitation. *Project CISEAU*.
- FAO (2015)** – l'état des ressources en sol du monde. , **92**.
- Farag R.S., Shalaby A.S., El-Baroty G.A., Ibrahim N.A., Ali M.A., Hassan E.M. (2004)** – Chemical and biological evaluation of the essential oils of different *Melaleuca* species. *Phytotherapy Research*, **18**, 30–35.
- Farhat L., Majdoub R., Khelifi S., Louati D., Amri A.E. (2017)** – Etude de l'impact des fortes précipitations de l'automne 2016 sur la dynamique des sels dans la région de Mahdia : étude de cas. , 10
- Faye B., Tine D., Dethié N., Cheikh D., Faye G., Ndiaye A. (2019b)** – Évolution des terres salées dans le nord de l'estuaire du Saloum (Sénégal). *Géomorphologie: relief, processus, environnement*.

- Faye A. H. (2020)** – Diversité des champignons mycorrhiziens associés aux *Casuarina* et *Melaleuca* dans les sols de la région de Fatick. Mémoire de licence. Institut Supérieur de Formation Agricole et Rurale, **60**.
- Feng G., Zhang F., Li X., Tian C., Tang C., 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**, 185–90.
- Flowers T.J., Colmer T.D. (2008)** – Salinity tolerance in halophytes. *New Phytologist*, 945–963.
- Franklin D.C., Brocklehurst P.S., Lynch D., Bowman D.M.J.S. (2007)** – Niche differentiation and regeneration in the seasonally flooded *Melaleuca* forests of northern Australia. *Journal of Tropical Ecology*, **23**, 457–467.
- Gerbeaud (2014)** – Les mycorhizes : une association surprenante entre plantes et champignons.
- Goyal K., Kumar T., Sharma P., Rao M., Ahmed V., Chauhan N.S. (2019)** – Crop Improvement Through Microbial Biotechnology: A Cross Talk. In: *Salt Stress, Microbes, and Plant Interactions: Mechanisms and Molecular Approaches*, pp. 69–90. Springer.
- Hachicha M. (2007)** – Les sols salés et leur mise en valeur en Tunisie. , **18**, 6.
- Hanana M., Hamrouni L., Cagnac O., Blumwald E. (2011)** – Mécanismes et stratégies cellulaires de tolérance à la salinité (NaCl) chez les plantes. *Environmental Reviews*, **19**.
- Hashem A., Abdallah* E.F., Wirth S., Egamberdieva D. (2016)** – Arbuscular mycorrhizal fungi alleviate salt stress in lupine (*Lupinus termis* Forsk.) through modulation of antioxidant defense systems and physiological traits. *Legume Research-An International Journal*, **39**, 198–207.
- Hillel (2005)** – Pubs.GISS: Hillel et al. 2005: Encyclopedia of Soils in the Environment.
- Hoher V., Ngom M., Carré-Mlouka A., Tisseyre P., Gherbi H., Svistoonoff S. (2019)** – Signalling in actinorhizal root nodule symbioses. *Antonie van Leeuwenhoek*, **112**, 23–29.
- Hussein S.A.M., Hashim A.N.M., El-Sharawy R.T., Seliem M.A., Linscheid M., Lindequist U., Nawwar M.A.M. (2007)** – Ericifolin: An eugenol 5-O-galloylglucoside and other phenolics from *Melaleuca ericifolia*. *Phytochemistry*, **68**, 1464–1470.
- Ikram H., Hayat B.A. (2018)** – La culture du quinoa dans la région d’Oued souf vis- à-vis le problème de la salinité d’étude morphophysologique. Université EchahidHamma Lakhdar -El OUED, Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie.
- Iwai C.B., Oo A.N., Topark-ngarm B. (2012)** – Soil property and microbial activity in natural salt affected soils in an alternating wet–dry tropical climate. *Geoderma*, **189–190**, 144–152.
- Jabnour M. (2008)** – Adaptation des plantes au stress salin: caractérisation de porteurs de sodium et potassium de la famille HKT chez le riz. CENTRE INTERNATIONAL D’ETUDE SUPERIEURES AGRONOMIQUES, Montpellier SUPAGRO.
- Javot H., Pumplin N., Harrison M.J. (2007)** – Phosphate in the arbuscular mycorrhizal symbiosis: transport properties and regulatory roles: Phosphate transport in the AM symbiosis. *Plant, Cell & Environment*, **30**, 310–322.

- Jvarlin (2012)** – Salinisation des sols — Wikirouge.
- Karimi G., Ghorbanli M., Heidari H., Nejad R.K., Assareh M.H. (2005)** – The effects of NaCl on growth, water relations, osmolytes and ion content in *Kochia prostrata*. *Biologia plantarum*, **49**, 301–304.
- Koly A. kader (2014)** – Salinisation des terres: le PADERCA aménage plus de 15.000 ha à Ziguinchor. *lejecos Le journal de l'économie sénégalaise*.
- Kumar M., Akhtar M.S. (2019)** – Application of Microbial Biotechnology in Improving Salt Stress and Crop Productivity. In: *Salt Stress, Microbes, and Plant Interactions: Mechanisms and Molecular Approaches: Volume 2* (ed Akhtar MS), pp. 133–159. Springer, Singapore.
- Kumar A., Verma J.P. (2018)** – Does plant—Microbe interaction confer stress tolerance in plants: A review? *Microbiological Research*, **207**, 41–52.
- Lacharme M. (2001)** – Le contrôle de la salinité dans les rizières. , **20**.
- Land Degradation Assessment (2009)** – Outils de gestion durable des terres au Sénégal: contribution de LADA. Rapport.
- Lahouel H. (2014)** – Contribution à l'étude de l'influence de la salinité sur le rendement des céréales (cas de l'orge) dans la région de Hemadna à Relizane.
- Lebrun JP, Stork AL (1991)** – Enumération des plantes à fleurs d'Afrique tropicale 1: 249 pp. Genève, Conservatoire et Jardin botaniques
- Lebrun JP, Stork AL (1992)** – Enumération des plantes à fleurs d'Afrique tropicale 2: 257 pp. Genève, Conservatoire et Jardin botaniques
- Lee E.-H., Eo J.-K., Ka K.-H., Eom A.-H. (2013)** – Diversity of Arbuscular Mycorrhizal Fungi and Their Roles in Ecosystems. *Mycobiology*, **41**, 121–125.
- Legros P.J.-P. (2009)** – La Salinisation des terres dans le monde. , **14**.
- Leye E., Diouf M., NDIAYE F., BASSIROU D., MAIGUIZO D., Diop TAHIR (2015)** – Effet de la mycorhization et de la salinité sur la croissance, les réponses biochimiques et la productivité de *Jatropha curcas* L., cultivée sous serre.
- Lozach E. (2001)** – Le sel et les microorganismes. Ecole Nationale Vétérinaire de MAISON ALFORT.
- Manzo Laminou O., IBRAHIM D., CAMPANELLA B., PAUL R. (2009)** – Effets de l'inoculation mycorhizienne du substrat sur la croissance et la résistance au stress hydrique de cinq espèces fixatrices de dunes : *Acacia raddiana* Savi ; *Acacia nilotica* (L.) Willd. Ex Del. var. *adansonii* ; *Acacia senegal* (L.) Willd ; *Prosopis chilensis* Stunz. et *Bauhinia rufescens* Lam.. , **10**.
- Mermoud A. (2006)** – Cours de physique du sol: Maîtrise de la salinité des sols. *Ecole polytechnique fédérale de Lausanne*, **23**.
- Montoroi J.-P. (2018)** – Sel pédologique : une menace pour les sols agricoles. , **12**.
- Munns R. (2005)** – Genes and salt tolerance: bringing them together. *New phytologist*, **167**, 645–663.

- Munns R., Tester M. (2008)** – Mechanisms of salinity tolerance. *Annual Review of Plant Biology*, **59**, 651–681.
- Naidu B.P., Paleg L.G., Jones G.P. (2000)** – Accumulation of proline analogues and adaptation of *Melaleuca* species to diverse environments in Australia. *Australian Journal of Botany*, **48**, 611.
- Navarro J.M., Pérez-Tornero O., Morte A. (2014)** – Alleviation of salt stress in citrus seedlings inoculated with arbuscular mycorrhizal fungi depends on the root stock salt tolerance. *Journal of plant physiology*, **171**, 76–85.
- Ndong M.T. (2018)** – Evaluation de l’effet du précédent inoculum microbien sur les performances de *Melaleuca leucadendron* (L.) dans les terres salées du terroir villageois de Ndiemou (Région de Fatick). Diplôme d’Ingénieur des Travaux Spécialité : Agriculture, **57**.
- Ndour B. (2006)** – Relations sol - plantes dans les écosystèmes terres salées du bassin arachidier du Sénégal. UNIVERSITE CHEIKH ANTA DIOP DE DAKAR (UCAD).
- Ndour M. (2017)** – Impact des bactéries stimulatrices de la croissance des plantes (PGPR) sur la symbiose mycorhizienne et fixatrice d’azote chez *Casuarina obesa* Miq. en condition de stress salin. Mémoire de Master en Agroforesterie. Université Assane Seck de Ziguinchor.
- Ngom M.C.N. (2017b)** – Impact du broyat de nodules, du sol sous couvert et du compost de filao sur la tolérance au sel des *Casuarina*. Mémoire de Master en Agroforesterie. Université Assane Seck de Ziguinchor, Sénégal, **75**.
- Ngom, M. (2016a)** – Caractérisation de souches de *Frankia* compatibles avec *Casuarina glauca* et *Casuarina equisetifolia* en conditions de stress salin pour une meilleure utilisation en reforestation au Sahel. Thèse de doctorat en Biotechnologies Végétales et Microbiennes et Amélioration des Plantes. Université Cheikh Anta Diop de Dakar, Sénégal, 233 p
- Ngom D., Fall T., Sarr O., Diatta S., Akpo L.E. (2013)** – Caractéristiques écologiques du peuplement ligneux de la réserve de biosphère du Ferlo (Nord Sénégal). *Journal of Applied Biosciences*, **65**.
- Ngom M., Gray K., Diagne N., Oshone R., Fardoux J., Gherbi H., Hocher V., Svistoonoff S., Laplaze L., Tisa L.S., Sy M.O., Champion A. (2016)** – Symbiotic Performance of Diverse *Frankia* Strains on Salt-Stressed *Casuarina glauca* and *Casuarina equisetifolia* Plants. *Frontiers in Plant Science*, **7**, 1331.
- N’goran A.A. (2018)** – Influence des arbres sur les teneurs en carbone et azote du sol dans la zone sylvopastorale du Sénégal. Université Cheikh Anta Diop, Département de Biologie Végétale.
- Nguyen N.T., Saneoka H., Suwa R., Fujita K. (2009)** – Provenance variation in tolerance of *Melaleuca cajuputi* trees to interactive effects of aluminum and salt. *Trees*, **23**, 649–664.
- Nishida H., Suzaki T. (2018)** – Nitrate-mediated control of root nodule symbiosis. *Current Opinion in Plant Biology*, **44**, 129–136.

- Noomene Hamza (2011)** – Memoire Online - Etude de la salinité des sols par la méthode de détection électromagnétique dans le périmètre irrigué de Kalàçat Landelous en Tunisie: cas d'une parcelle de courge. *Memoire Online*.
- Noosidum A., Prabaripai A., Chareonviriyaphap T., Chandrapatya A. (2008)** – Excito-repellency properties of essential oils from *Melaleuca leucadendron* L., *Litsea cubeba* (Lour.) Persoon, and *Litsea salicifolia* (Nees) on *Aedes aegypti* (L.) mosquitoes. *Journal of Vector Ecology*, **33**, 305–312.
- Okon O.G. (2019)** – Effect of Salinity on Physiological Processes in Plants. In: *Microorganisms in Saline Environments: Strategies and Functions* (eds Giri B, Varma A), pp. 237–262. Springer International Publishing, Cham.
- Oshone R, Mansour SR, Tisa LS. (2013)** – Effect of salt stress on the physiology of *Frankia* sp. strain Cc16. *Journal of Biosciences*. 38:699–702, doi: 10.1007/s12038-013-9371-2. *Plant Production Science*, 13, 169–176.
- Oshone R., Ngom M., Chu F., Mansour S., Sy M.O., Champion A., Tisa L.S. (2017)** – Genomic, transcriptomic, and proteomic approaches towards understanding the molecular mechanisms of salt tolerance in *Frankia* strains isolated from *Casuarina* trees. *BMC genomics*, **18**, 633.
- Parida A.K., Das A.B. (2005)** – Salt tolerance and salinity effects on plants: a review. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, **60**, 324–349.
- Parniske M. (2008)** – Arbuscular mycorrhiza: the mother of plant root endosymbioses. *Nature Reviews Microbiology*, **6**, 763–775.
- Patel R.S., Panchal P., Vaghasiya D., Patel V. (2018)** – Observation of Two Important Angiosperm Tree Species of Gujarat College, Ahmedabad, Gujarat, India.
- Perrine-Walker F., Doumas P., Lucas M., Vaissayre V., Beauchemin N.J., Band L.R., Chopard J., Crabos A., Conejero G., Péret B., King J.R., Verdeil J.-L., Hocher V., Franche C., Bennett M.J., Tisa L.S., Laplaze L. (2010)** – Auxin Carriers Localization Drives Auxin Accumulation in Plant Cells Infected by *Frankia* in *Casuarina glauca* Actinorhizal Nodules. *Plant Physiology*, **154**, 1372–1380.
- Pierrick (2019)** – Goménol: L'huile essentielle de Niaouli. *LABOCREATION*.
- Qadir M., Ghafoor A., Murtaza G. (2000)** – Amelioration strategies for saline soils: a review. *Land Degradation & Development*, **11**, 501–521.
- Qadir M., Oster J. (2002)** – Vegetative bioremediation of calcareous sodic soils: history, mechanisms, and evaluation. *Irrigation Science*, **21**, 91–101.
- Qadir M., Oster J.D. (2004)** – Crop and irrigation management strategies for saline-sodic soils and waters aimed at environmentally sustainable agriculture. *Science of the total environment*, **323**, 1–19.
- Qadir M., Quillérrou E., Nangia V., Murtaza G., Singh M., Thomas R.J., Drechsel P., Noble A.D. (2014)** – Economics of salt induced land degradation and restoration, natural resources forum.
- Raju R., Thimmappa K., Kumar P., Kumar S., Tripathi R. (2016)** – Reclamation of Saline Soils through Subsurface Drainage Technology in Haryana – An Economic Impact Analysis. , 194–201.

- Ribeiro-Barros A.I., Catarino S., Moura I., Ramalho J.C., Romeiras M.M., Ghodhbane-Gtari F. (2019)** – Actinorhizal trees and shrubs from Africa: distribution, conservation and uses. *Antonie van Leeuwenhoek*, **112**, 31–46.
- Ruth B., Khalvati M., Schmidhalter U. (2011)** – Quantification of mycorrhizal water uptake via high-resolution on-line water content sensors. *Plant and Soil*, **342**, 459–468.
- Sandhya V., Grover M., Reddy G., Venkateswarlu B. (2009)** – Alleviation of drought stress effects in sunflower seedlings by the exopolysaccharides producing *Pseudomonas putida* strain GAP-P45. *Biology and fertility of soils*, **46**, 17–26.
- Sawers R.J., Svane S.F., Quan C., Grønlund M., Wozniak B., Gebreselassie M.-N., González-Muñoz E., Chávez Montes R.A., Baxter I., Goudet J. (2017)** – Phosphorus acquisition efficiency in arbuscular mycorrhizal maize is correlated with the abundance of root-external hyphae and the accumulation of transcripts encoding PHT1 phosphate transporters. *New Phytologist*, **214**, 632–643.
- Sayed W.F. (2011)** – Improving *Casuarina* growth and symbiosis with *Frankia* under different soil and environmental conditions—review. *Folia Microbiologica*, **56**, 1–9.
- Selami N. (2017)** – «ASSOCIATIONS SYMBIOTIQUES». Université des Sciences et de la Technologie D’Oran Mohamed Boudiaf, algerie.
- Selosse M.-A. (2018)** – diversité des alliances mycorhiziennes et fonctionnement de la symbiose. , 6.
- Shankar V., Evelin H. (2019)** – Strategies for Reclamation of Saline Soils. , 11.
- Sharma S.B., Sayyed R.Z., Trivedi M.H., Gobi T.A. (2013)** – Phosphate solubilizing microbes: sustainable approach for managing phosphorus deficiency in agricultural soils. *Springer Plus*, **2**, 587.
- Sheng M., Tang M., Chen H., Yang B., Zhang F., Huang Y. (2008)** – Influence of arbuscular mycorrhizal on photosynthesis and water status of maize plants under salt stress. *Mycorrhiza*, **18**, 287–296.
- Shrivastava P., Kumar R. (2015)** – Soil salinity: A serious environmental issue and plant growth promoting bacteria as one of the tools for its alleviation. *Saudi Journal of Biological Sciences*, **22**, 123–131.
- Sieverding E. (1990)** – Ecology of VAM fungi in tropical agrosystems. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, **29**, 369–390.
- Singh G. (2009)** – Salinity-related desertification and management strategies: Indian experience. *Land Degradation & Development*, **20**, 367–385.
- Singh K. (2016)** – Microbial and Enzyme Activities of Saline and Sodic Soils. *Land Degradation & Development*, **27**, 706–718.
- Soltner R. (2000)** – Les bases de la production végétale: tome1 le sol et son amélioration. Coll. *Sciences et techniques agricoles*. Sainte-Gemmes-sur-Loire, USA.
- Song J.I.E., Feng G.U., Tian C., Zhang F. (2005)** – Strategies for adaptation of *Suaeda physophora*, *Haloxylon ammodendron* and *Haloxylon persicum* to a saline environment during seed-germination stage. *Annals of Botany*, **96**, 399–405.

- Soumaré A., Manga A., Thiao M., Ndoye I., Diop T. (2008)** – Effet de l'inoculation des champignons mycorhiziens arbusculaires sur le développement d'*Acacia nilotica* subsp. *Adestringens* soumis à différentes concentrations de sel. , 10.
- Srivastava A., Singh S.S., Mishra A.K. (2013)** – Sodium transport and mechanism (s) of sodium tolerance in *Frankia* strains. *Journal of basic microbiology*, **53**, 163–174.
- Srivastava, Wu Qiang-Sheng, Giri Bhoopander (2019)** – Salinity: An Overview. *First Online: 26 July 2019*.
- Surh J., Yun J.-M. (2012)** – Antioxidant and Anti-inflammatory Activities of Butanol Extract of *Melaleuca leucadendron* L. *Preventive Nutrition and Food Science*, **17**, 22.
- Swallow M.J.B., O'Sullivan G. (2019)** – Biomimicry of vascular plants as a means of saline soil remediation. *Science of The Total Environment*, **655**, 84–91.
- Sy M.O. (2006)** – Utilisation de la transgenèse et de promoteurs hétérologues pour l'étude des phases précoces de la symbiose *Casuarina - Frankia*. UNIVERSITE CHEIKH ANTA DIOP DE DAKAR (UCAD), biologie végétale.
- Tedersoo L., Bahram M. (2019)** – Mycorrhizal types differ in ecophysiology and alter plant nutrition and soil processes. *Biological Reviews*, **94**, 1857–1880.
- Tedersoo L., May T.W., Smith M.E. (2010)** – Ectomycorrhizal lifestyle in fungi: global diversity, distribution, and evolution of phylogenetic lineages. *Mycorrhiza*, **20**, 217–263.
- Tejada M., Garcia C., Gonzalez J.L., 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.
- Tester M., Davenport R. (2003)** – Na⁺ Tolerance and Na⁺ Transport in Higher Plants. *Annals of Botany*, **91**, 503–527.
- Tian C.Y., Feng G., Li X.L., Zhang F.S. (2004)** – Different effects of arbuscular mycorrhizal fungal isolates from saline or non-saline soil on salinity tolerance of plants. *Applied Soil Ecology*, **26**, 143–148.
- Tran D.B., Hoang T.V., Dargusch P. (2015)** – An assessment of the carbon stocks and sodicity tolerance of disturbed *Melaleuca* forests in Southern Vietnam. *Carbon Balance and Management*, **10**, 15.
- Trouvelot S., Bonneau L., Redecker D., Van Tuinen D., Adrian M., Wipf D. (2015)** – Arbuscular mycorrhiza symbiosis in viticulture: a review. *Agronomy for sustainable development*, **35**, 1449–1467.
- Vincent B. (2018)** – Contribution de la symbiose fixatrice d'azote dans l'adaptation d'une légumineuse à des sols contrastés : le modèle *Acacia spirorbis* et les contraintes édaphiques extrêmes rencontrées en Nouvelle-Calédonie. *BOIS & FORETS DES TROPIQUES*, **341**, 87.
- Wang H.-Y., Shen Q.-H., Zhou J.-M., Wang J., Du C.-W., Chen X.-Q. (2011)** – Plants use alternative strategies to utilize non exchangeable potassium in minerals. *Plant and Soil*, **343**, 209–220.
- Wang W., Shi J., Xie Q., Jiang Y., Yu N., Wang E. (2017)** – Nutrient Exchange and Regulation in Arbuscular Mycorrhizal Symbiosis. *Molecular Plant*, **10**, 1147–1158.

- Wang L., Sun X., Li S., Zhang T., Zhang W., 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**, e89185.
- Waters M.T., Gutjahr C., Bennett T., Nelson D.C. (2017)** – Strigolactone Signaling and Evolution. *Annual Review of Plant Biology*, **68**, 291–322.
- Xiong L., Zhu J.-K. (2002)** – Molecular and genetic aspects of plant responses to osmotic stress. *Plant, cell & environment*, **25**, 131–139.
- Yadav A.N., Sharma D., Gulati S., Singh S., Dey R., Pal K.K., Kaushik R., Saxena A.K. (2015)** – Haloarchaea Endowed with Phosphorus Solubilization Attribute Implicated in Phosphorus Cycle. *Scientific Reports*, **5**, 1–10.
- Yahmed J. (2013)** – Etude des propriétés de tolérance au déficit hydrique et au stress salin de géotypes appartenant au genre *Poncirus* et au groupe des mandariniers. Centre international d'études supérieures en sciences agronomiques, Montpellier.
- Zekri S., Al-Rawahy S.A., Naifer A. (2010)** – Socio-economic considerations of salinity: descriptive statistics of the Batinah sampled farms. *Published in the Monograph on Management of Salt-Affected Soils and Water for Sustainable Agriculture (Mushtaque A, Al-Rawahy SA, Hussain N (eds)). Sultan Qaboos University, Oman*, 99–113.
- Zhu J.-K. (2007)** – Plant Salt Stress. In: *eLS*, p. . American Cancer Society.

ANNEXES

Annexe 1. Significativité des traitements sur les paramètres dendrométriques

Hauteurs						
	Degrés de liberté	Somme des écarts	Moyenne des écarts	F value	Pr (>F)	
Traitements	3	81038	27013	2.337	0.073	.
Residuals	380	4392438	11559			
Diamètres au collet						
	Degrés de liberté	Somme des écarts	Moyenne des écarts	F value	Pr (>F)	
Traitements	3	84880	28293	2.452	0.063	.
Residuals	380	4384071	11537			
Diamètres houppier Nord-Sud						
	Degrés de liberté	Somme des écarts	Moyenne des écarts	F value	Pr (>F)	
Traitements	3	99759	33253	2.892	0.0353	*
Residuals	380	4369233	11498			
Diamètres houppier Est-Ouest						
	Degrés de liberté	Somme des écarts	Moyenne des écarts	F value	Pr (>F)	
Traitements	3	124204	41401	3.623	0.0133	*
Residuals	380	4342059	11426			
Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 '' 1						

Annexe 2. Fiche d'inventaire phytosociologique

N° Placette:									
Coordonnées placette:									
Longitude: Latitude: Altitude:									
Date:									
N°	Nom scientifique de l'espèce	Présence: <i>Melaleuca</i>		Coefficients d'abondance/dominance					
		Vivants	Morts	+	1	2	3	4	5
1									
2									
3									
4									
5									
N									

Annexe 3. Recouvrement moyen des espèces sous couvert et hors couvert de *Melaleuca*

Espèces	R M %	
	S C	H C
<i>Andropogon pinguipes</i> (Stapf)	1,79	0,12
<i>Dactyloctenium aegyptium</i> (L.) Willd	0,87	0,12
<i>Chloris barbata</i> (L.) Sw.	2,25	0,25
<i>Eragrostis tenella</i> (L.) Beauv.	23,58	6,19
<i>Eragrostis tremula</i> Hochst. Ex Steud.	1,00	0,25
<i>Paspalum vaginatum</i> (L.)	2,66	5,44
<i>Sporobolus robustus</i> Kunth	0,06	2,31
<i>Ctenium elegans</i> Kunth	2,52	2,75
<i>Corchorus tridens</i> L.	0,02	-
<i>Sida alba</i> L.	0,52	0,25
<i>Sphaeranthus senegalensis</i> DC.	2,25	2,35
<i>Hygrophila senegalensis</i> (Nees) T.A	11,12	20,75
<i>Spermacoce verticillata</i> L.	29,39	10,94
<i>Spermacoce radiata</i> (DC.)	0,02	0,04
<i>phyloxerus vermicularis</i> (L.)	0,25	0,37
<i>Schultesia stenophylla</i> Mart. var. latifolia	-	0,02
<i>Striga</i> sp	0,02	-
<i>Cassia obtusifolia</i> (L.)	0,04	-
Total (%)	78,33	52,16

Annexe 4. Broutage des herbacées à l'intérieur de la plantation de *Melaleuca leucadendron* (L.)

