

Étude éco-physiologique du tamarinier (*Tamarindus indica* L.) en milieu tropical aride



ir. Sali Bourou



Promoteur

Prof. dr. ir. Patrick Van Damme, Faculté des Sciences en Bio-Ingénierie, Département de production végétale, Laboratoire d'Agronomie Tropicale et Subtropicale et d'Ethnobotanique, Coupure Links 653 – B-9000 Gand (Belgique), Tel : + 32 9 264 60 90, Université de Gand, Belgique, Patrick.VanDamme@ugent.be

Président

Prof. dr. ir. Peter Bossier, Faculté des Sciences en Bio-Ingénierie, Département des productions animales, Laboratoire d'Aquaculture, Rozier 44 - 9000 Gand (Belgique), Tel : + 32 9 264 37 59, Université de Gand, Belgique, Peter.Bossier@ugent.be

Examineurs

Dr. Colm Bowe, Ecole des Sciences Naturelles et de Psychologie, Bureau 350a bâtiment James Parsons, Rue Byrom, Liverpool L3 3AF, Université John Moores de Liverpool, Tel : +44 (0)151 231 2027, C.Bowe@ljmu.ac.uk

Prof. dr. ir. Monica Höfte, Faculté des Sciences en Bio-Ingénierie, Département de protection des végétaux, Coupure Links 653 – B-9000 Gand (Belgique), Tel : + 32 9 264 60 21, Université de Gand, Belgique, Monica.Hofte@ugent.be

Prof. dr. ir. Roeland Samson, Département de Bio-Ingénierie, Middelheimcampus G.V.608 Groenenborgerlaan 171 - 2020 Anvers (Belgique), Tel : +32 3 265 34 37, fax : 03 265 32 25, Université d'Anvers, Belgique, Roeland.Samson@ua.ac.be

Doyen: Prof. dr. ir. Guido Van Huylenbroeck

Recteur: Prof. dr. Paul Van Cauwenberge

ir. Sali Bourou

**Étude éco-physiologique du tamarinier (*T. indica*) en milieu
tropical aride**

**Thèse présentée pour l'obtention du grade de Docteur (PhD) en Sciences Biologiques Appliquées :
Section Agronomie**

Titre en flamand

Eco-fysiologische studie van tamarinde (*T. indica*) in tropisch droog milieu

Les photos de la page de garde sont faites par Sali Bourou

Elles illustrent l'état d'un tamarinier adulte, ses fruits, la transformation du fruit en jus et les graines.

Imprimée par les Presses Universitaires, Zelzate, Belgique

Citation :

Bourou S (2012). Étude éco-physiologique du tamarinier (*Tamarindus indica* L.) en milieu tropical aride, Thèse de Doctorat (PhD), Faculté des Sciences en Bio-Ingénieries, Université de Gand, Belgique.

ISBN : 978-90-5989-509-6

L'auteur et le promoteur autorisent la consultation de ce travail uniquement pour usage personnel. Toute autre utilisation est interdite par la loi d'impression. La reproduction d'une partie de ce travail doit se faire avec l'accord préalable de l'auteur.

A la mémoire

De mon feu grand frère, Bouba Robert,

De mon feu père, Bourou Tizi

De ce jeune sénégalais, feu Samba Sarr

et

A toi, maman

A mon épouse, Françoise Erayaväï Boubä

A mes enfants, Farissa et Franck Ismaël

A toute ma famille

Au monde rural

REMERCIEMENTS

Le présent travail est le fruit de la collaboration entre plusieurs institutions et personnes. Nous voudrions ici exprimer à tous et à toutes nos reconnaissances pour leurs efforts fournis pour son achèvement. Nous pensons d'abord au Prof. dr. ir. Patrick Van Damme, promoteur de ce travail. Vous avez été, cher Professeur, tout pour nous. Vos conseils, votre sens de l'humour et du travail bien fait, nous ont particulièrement marqué au cours de nos travaux. Nous vous rendons un vibrant hommage.

Nous rendons un grand hommage à monsieur Macoumba Diouf, co-directeur de cette thèse. Malgré votre programme si souvent chargé nous vous remercions sincèrement de tout ce que vous avez pu accomplir à notre égard. C'est aussi le moment de remercier la direction de l'ISRA, son personnel administratif et scientifique, Mme Mariétou Sall, assistante du Directeur Général de l'ISRA et de saluer la mémoire du Professeur Nicolas Diallo.

Nous exprimons notre gratitude aux Prof. dr. ir. Peter Bossier ; Prof. dr. ir. Monica Höfte et Prof. dr. ir. Roeland Samson, de l'honneur que vous nous faites de siéger dans notre jury. Nous vous en sommes reconnaissants.

Nous exprimons nos vifs remerciements au CERAAS (Centre d'Étude Régional pour l'Amélioration de l'Adaptation à la Sécheresse) : structure d'accueil au Sénégal. Ainsi, nous pensons aux anciens Directeurs ; dr. Dogo Seck, dr. Ousmane Ndoye et à l'actuel dr. Ndiaga Cissé. A travers vous, nous exprimons toute notre gratitude à l'ensemble du personnel (administratif, scientifique et d'appui). On pense ici à : dr. Modou Sène, dr. Bertrand Muller, dr. Cheikh Thiaw, dr. Bassirou Sine, dr. Codou Guèye, Couna Sylla, Mbaye Ndoye, Amadou Kandji, Cheikhou Dramé, Mlle Mariama Senghor, Mme Thérèse Faye, Mlle Aida Faye, Tossim Hodo Abalo (Toss), Malick Ndiaye, Joséphine Faye (Sosso), feu Edouard Ndoye, Pa Elimane, Idrissa Cissé, Ousmane Faye, Maha Dembélé et Ali Egué Ka. Nous pensons aussi aux techniciens de Bambey, notamment Sidy Sidibé, Abdou Faye, Cheikh Sène, Ibrahima Ndong et tous leurs camarades.

Le travail que nous présentons ici a été conduit dans le cadre du projet DADOBAT (*Development And Domestication Of Baobab and Tamarind*) financé par l'Union Européenne. C'est l'occasion pour nous de remercier l'ensemble des équipes d'exécution du projet. Nous pensons ici aux différents partenaires notamment au Bénin, Mali, Autriche, Angleterre et Belgique, qui nous ont toujours accompagné. Nous rendons également un hommage mérité à l'ensemble de l'équipe de coordination et de gestion du projet, notamment dr. ir. Emmy De Caluwé et ir. Sitske De Groote.

Nous tenons ici à témoigner toute notre reconnaissance à l'endroit de l'IRAD (Institut de Recherche Agricole pour le Développement, Cameroun). Nous pensons ici à la Direction Générale notamment le dr. Woin Noé à qui nous exprimons toute notre gratitude et reconnaissance pour votre contribution majeure à notre intégration au sein de la famille IRAD et pour vos conseils sans cesse : MERCI ! Nos reconnaissances vont à l'endroit du dr. Danjouma Aboubakar A. K. et du dr. Jean Paul Olina. Merci à vous tous, responsables de l'IRAD, pour vos encouragements et de votre compréhension durant toute notre longue absence de la station polyvalente IRAD de Garoua.

C'est également l'occasion de rendre un hommage aux institutions partenaires principalement le CIRAD (Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement de France), et nous pensons ici au dr. Jean-Yves Rey et à M. Michel Havard. A vous, nous disons : MERCI ! Nous remercions également dr. Colm Bowe et dr. Nazmul Haq de l'université John Moores de Liverpool et l'université de Southampton respectivement, mais aussi le dr. Fatimata Ndiaye et surtout le Prof. dr. Tahir Diop de l'université Cheikh Anta Diop, par ailleurs responsable du Laboratoire de Biotechnologie des Champignons (LBC).

Nous rendons hommage à toute la famille de Doubi, Asta, Deubeula, Oumarou, Isbéti, Saïdou, Ba-Sali, Madi, Mana, Alim, Anavaï et Zounéki : merci à vous tous pour le soutien. Nous saluons le courage et la patience de la famille du feu Bouba Robert pendant mon absence, nous pensons ici à la veuve Fadimatou Lamy et ses enfants : Aminatou, Aïcha, Maliki, Maïmouna et Abdoul. Nos pensées vont également à la belle-famille, notamment à la mémoire du beau-père (Bouba Ourbane) et à celle de la belle-mère, Vondou Asta Marie. Que votre âme repose en paix. Merci à vous Amamissa, Papi, oncle Bouba Pierre Pierre (Beuda).

Nous tenons à témoigner toute notre reconnaissance à l'endroit de nos camarades stagiaires du CERAAS, pour tous ces bons moments passés à la salle des thésards. Nos pensées vont à l'endroit de : Aïssata Ba, Seyni Boureima, Marème Niang, Ambroise Siéné, Roger Bayala, Nouhoun Belko, Charlotte Tonessia, Lucie Aba, Patrice Kouakou, Bassiaka Ouattara, Madina Diancoumba, et Thiéry Tovignan. Nous n'oublions surtout pas ceux du Laboratoire d'Agronomie Tropicale et Subtropicale et d'Ethnobotanique de Gand (Belgique) : Ermias Lulekal Molla, Sidi Sanogo, Jila Sadeghi, Patrice Zerbo, etc.

Nous remercions sincèrement, Annita Goethals, Machteld Sonnevile, et particulièrement Sabine Van Cauwenberghe et sa famille (pour qui les mots me manquent pour dire MERCI), Isabel Vandriessche, ir. Céline Termote, ir. Wouter Vanhove pour toutes les facilités données au laboratoire (Tropicallab).

En fin nous tenons à remercier la sympathique communauté des Pères Salésiens Don Bosco de Gand, et particulièrement Mgr Luc Van Looy (Evêque de Gand) et les Pères : Alix Cloutte (Père Directeur), Rik De Bock, Jozef De Witte, Norbert Carrette, Lambert Penders, Gust Dereere, Daniel Malfait, Romain Folens, Dominiek Deraeve, Delf Koen, Leo Verbelen, Albert Sabbe, Josef Vandendriessche, Walter Van Wouwe et feu Maurice Ketelslegers, pour leur chaleureux accueil et sympathie lors de nos multiples séjours à Gand.

Table des matières

Liste des tableaux	xv
Liste des figures.....	xvi
Liste des photos.....	xvi
Liste des acronymes.....	xix

Introduction générale 1

Chapitre 1: Synthèse des connaissances. 5

1.1.	Le milieu d'étude : le Sénégal	6
1.1.1	La situation géographique	6
1.1.2	Situation politique et économique	6
1.1.3	Le climat, la végétation et le relief	7
1.1.4	La population	11
1.2	La politique agricole	12
1.3	Botanique, écologie et importance économique du tamarinier (<i>Tamarindus indica</i> L.).....	13
1.3.1	Taxonomie	13
1.3.2	La phytogéographie du tamarinier	15
1.3.3	Phénologie et biologie de la reproduction de la plante.....	17
1.3.4	Utilisation et importance économique du tamarinier	19
1.3.5	Quelques caractéristiques éco-physiologiques du tamarinier.....	22
1.4	La notion de déficit hydrique et la symbiose mycorhizienne	23
1.4.1	Le concept de sécheresse et du déficit hydrique des plantes	23
1.4.2	La symbiose mycorhizienne.....	25
1.4.3	Classification des champignons mycorhiziens arbusculaires	27
1.4.4	Caractéristiques de quelques genres des glomales	28
1.4.5	Intérêt de la symbiose mycorhizienne	30

Chapitre 2: Notions de distribution, densité et déterminisme écologique des espèces végétales..... 33

2.1	Introduction	34
2.2	Quelques facteurs qui contribuent à la dégradation des espèces ligneuses forestières en zone tropicale africaine	35
2.2.1	Les prélèvements.....	35
2.2.2	Les facteurs du climat	36
2.3	Le changement climatique et incidence sur l'écologie des végétaux.....	37
2.3.1	La notion de peuplement et de sa distribution.....	37
2.3.2	Modélisation de la distribution des espèces vivantes	37

Chapitre 3: Densité et distribution du tamarinier (*Tamarindus indica* L.) au Sénégal, évaluation du potentiel d'adaptation au changement climatique..... 41

3.1	Introduction	42
-----	--------------------	----

3.2	Méthodologie.....	44
3.2.1	Sources des données.....	44
3.2.2	Données climatiques	46
3.2.3	Modélisation de la distribution.....	47
3.2.4	La validation du modèle MAXENT	48
3.2.5	Le seuil.....	49
3.2.6	Explication de la distribution par les variables environnementales.....	49
3.2.7	Les courbes de réponse des variables.....	50
3.2.8	L'analyse statistique des données de densité de peuplement	50
3.3	Résultats	50
3.3.1	Carte de la distribution actuelle.....	50
3.3.2	L'analyse des densités des peuplements de tamarinier au Sénégal	50
3.3.3	Modèle de distribution de l'espèce.....	52
3.4	Discussion.....	56
3.5	Conclusion.....	59

Chapitre 4: Potentiel mycorhizien des parcs à tamariniers (*Tamarindus indica* L.) dans trois zones agro-écologiques du Sénégal..... 61

4.1	Introduction	62
4.2	Méthodologie.....	63
4.2.1	Colonisation des racines des arbres du peuplement	63
4.2.2	Piégeage des propagules (spores viables) des champignons mycorhiziens.....	66
4.2.3	La diversité des champignons mycorhiziens à arbuscules associés au tamarinier	67
4.3	Analyse des données.....	68
4.4	Résultats et discussions.....	69
4.4.1	La colonisation des racines	69
4.4.2	Le « Most Probable Number » (MPN) observé au niveau de la plante piège (<i>Zea mays</i>).....	70
4.4.3	La diversité mycorhizienne	72

Chapitre 5: Effets de l'inoculation mycorhizienne sur le comportement agro-physiologique des écotypes du tamarinier (*Tamarindus indica* L.) au Sénégal..... 77

5.1	Introduction	78
5.2	Matériels et méthodes.....	80
5.2.1	Matériel végétal.....	80
5.2.2	Matériels fongiques.....	81
5.2.3	Dispositif expérimental	82
5.2.4	Hypothèses et paramètres observés.....	83
5.3	L'analyse statistique	85
5.4	Résultats	85
5.4.1	Les paramètres morphologiques	86
5.4.2	Les paramètres éco-physiologiques.....	87
5.4.3	La photosynthèse nette (Pn)	88

5.4.4	La conductance stomatique (Gs).....	89
5.4.5	L'efficacité d'utilisation de l'eau instantanée (EUEi).....	90
5.5	Discussion.....	91

Chapitre 6: Etude éco-physiologique du tamarinier (*Tamarindus indica* L.) dans deux zones agro-écologiques contrastées du Sénégal. 95

6.1	Introduction	96
6.2	Méthodologie.....	97
6.2.1	Données climatiques	97
6.2.2	Les caractéristiques climatiques des deux sites d'étude.....	97
6.2.3	Echantillonnage des arbres dans les sites d'étude	99
6.2.4	Fréquence des mesures et observations des paramètres éco-physiologiques	102
6.2.5	Etat hydrique du sol	105
6.2.6	Le bilan hydrique du sol.....	108
6.2.7	La phénologie et la fructification	110
6.3	Traitement et analyse des données.....	112
6.4	Résultats	112
6.4.1	Les facteurs du climat	112
6.4.2	Le potentiel hydrique foliaire.....	113
6.4.3	Evolution saisonnière des échanges gazeux	118
6.4.4	Le bilan hydrique	122
6.4.5	La phénologie, floraison et fructification	123
6.5	Discussion.....	126

Chapitre 7: Conclusion générale et recommandations. 129

7.1	Densité et distribution du tamarinier (<i>Tamarindus indica</i> L.) au Sénégal, évaluation du potentiel d'adaptation au changement climatique.....	130
7.2	Diversité mycorhizienne et l'interaction plante/mycorhizes.....	131
7.3	Analyse du fonctionnement hydrique du tamarinier.....	133
7.4	Recommandations.....	134

Références bibliographiques..... 137

Curriculum Vitae..... 161

Liste des tableaux

Tableau 1.1 : Caractéristiques des zones agro-écologiques du Sénégal	11
Tableau 1.2 : Composition ethnique de la population du Sénégal.....	12
Tableau 1.3 : État de la production actuelle et des importations du tamarinier dans le monde.....	16
Tableau 1.4 : Valeur nutritive par 100 g de la partie comestible du tamarinier.....	21
Tableau 3.1 : Caractéristiques de développement de la population à l'horizon 2100	47
Tableau 3.2 : Description des modèles climatiques utilisés	47
Tableau 4.1 : Fréquence de colonisation des racines de tamariniers <i>in situ</i>	69
Tableau 4.2 : Caractéristiques physico-chimiques des sites de peuplement de tamarinier.....	70
Tableau 5.1 : Sites de collecte du matériel végétal.....	81
Tableau 5.2 : Hauteur (cm) des plants inoculés au <i>Glomus aggregatum</i> et <i>G. mosseae</i> , et le témoin.....	86
Tableau 5.3 : Diamètre au collet (cm) des plants inoculés au <i>G. aggregatum</i> et <i>G. mossaea</i> , et le témoin	87
Tableau 6.2 : Bilan hydrique et consommation journalière du tamarinier	122

Liste des figures

Figure 1.1: Carte de déplacement des isohyètes au Sénégal	8
Figure 1.2: Carte agro-écologique du Sénégal effectuée sur la base du bilan hydrique	10
Figure 1.3: Arbre phylogénétique des angiospermes	15
Figure 1.4: Aire de dispersion dans le monde et origine du tamarinier	16
Figure 1.5: Aire de distribution du tamarinier en Afrique	17
Figure 3.1: Carte des points de présence du tamarinier au Sénégal	44
Figure 3.2: Description schématique de la méthode des transects	45
Figure 3.3: Variation de la densité des tamariniers	51
Figure 3.4: Relation entre le nombre moyen de tamariniers et la distance avec le village	51
Figure 3.5: Courbes d'explication des variables climatiques de la prédiction de la distribution	53
Figure 3.6: A) Index d'aptitude de la zone de distribution actuelle de tamarinier au Sénégal (la couleur rouge représente une forte probabilité d'aptitude); B) état actuel des zones propices au développement tamarinier; C) capacité d'aptitude actuelle et future indiquant les variations des zones propices au développement du tamarinier en fonction des scénarios climatiques.	55
Figure 4.1: Schéma descriptif de la méthode du Gridline	65
Figure 4.2: Sites de peuplement de tamariniers	67
Figure 4.3: Analyse en composante multiples des paramètres caractéristiques du sol en relation avec valeur du MPN (Most Propagule Number).....	71
Figure 4.4: Relation entre la valeur du MPN et le pourcentage de colonisation racinaire des arbres de tamariniers <i>in situ</i>	72
Figure 4.5: Analyse factorielle en composantes principales de la diversité mycorhizienne associée au tamarinier.....	73
Figure 5.1: Plan du dispositif expérimental.....	82
Figure 5.2: Comparaison de la photosynthèse nette moyenne des plants inoculés et le témoin.....	88
Figure 5.3: Conductance stomatique moyenne des plants inoculés et le témoin.	89
Figure 5.4: Efficience d'utilisation de l'eau des plants inoculés et le témoin.....	90

Figure 6.1: Carte des isohyètes du Sénégal	98
Figure 6.2: Structure des peuplements de tamarinier dans les 2 sites de l'étude éco-physiologique	101
Figure 6.3: Schéma de fonctionnement d'une chambre à pression	103
Figure 6.4: Dispositif de suivi éco-physiologique	105
Figure 6.5 : Etalonnage de la sonde à neutrons Solo 25 (T7) 0-30 cm	107
Figure 6.6: Etalonnage de la sonde à neutrons Solo 25 (T7) 30-600 cm.	107
Figure 6.7: Evolution du stade floral chez <i>Tamarindus indica</i> L.	111
Figure 6.8: Evolution de la cinétique journalière du potentiel hydrique foliaire	115
Figure 6.9 (a & b): Evolution saisonnière du gain de tension et de l'écart $P_{sb} - P_{min}$ (δ)	117
Figure 6.10: Evolution saisonnière de l'activité photosynthétique	118
Figure 6.11: Evolution saisonnière de l'efficacité d'utilisation de l'eau	119
Figure 6.12: Profils hydriques du sol sous les tamariniers sur le site de Mbassis	121
Figure 6.13: Profils hydriques du sol sous les tamariniers étudiés sur le site de Niokhoul	121
Figure 6.14: Evolution de l'état de feuillaison, floraison et fructification de tamarinier	125

Liste des photos

Photo 1.1: Le tamarinier et schéma de ses organes reproducteurs	18
Photo 5.1: Mesure du diamètre au collet	84
Photo 6.1: Collecte des données climatiques.....	98
Photo 6.2: Evolution de l'état de feuillaison du tamarinier au Sénégal.....	124

Liste des acronymes

ABA	Acide ABscissique
ANOVA	ANalysis Of VAriance
APX	Abscorbate PeroXydase
AUC	Area Under the ROC Curve
BCEAO	Banque Centrale des États de l'Afrique de l'Ouest
CCCMA-CGCM2	Canadian Centre for Climate Modeling and Analysis
CEC	Capacité d'Échange Cationique
CERAAS	Centre d'Étude Régional pour l'Amélioration de l'Adaptation à la Sécheresse
CIRAD	Centre de Coopération International en Recherche Agronomique pour le Développement
CMA	Champignon Mycorhizien Arbusculaire
CN	Comptage Neutronique
CNC	Comptage Neutronique Corrigé
CNe	Comptage Neutronique de Référence
CSIRO-MK2	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation
DADOBAT	Domestication And Development Of Baobab And Tamarind
DhP	Diamètre à Hauteur de Poitrine
ENFA	Ecological Niche Factor Analysis
ETM	Évapotranspiration Maximale
ETP	Évapotranspiration Potentielle
ETR	Évapotranspiration Réelle
EUE	Efficienc e d'Utilisation de l'Eau
EUEi	Efficienc e d'Utilisation de l'Eau Instantanée
FAO	Food and Agriculture Organisation of the United Nations
GIEC	Groupe d'Expert Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat
Gs	Conductance Stomatique
Gt	Gain de Tension
Hp	Humidité Pondérale
Hv	Humidité Volumique
ICRAF	International Centre for Research in Agroforestry
IRAD	Institut de Recherche Agricole pour le Développement

IRD	Institut de Recherche pour le Développement
ISRA	Institut Sénégalais de Recherche Agricoles
JAS	Jour Après Semis
LAI	Leaf Area Index
LBC	Laboratoire de Biotechnologie des Champignons
MAXENT	MAXimum ENTropic model
MPN	Most Probable Number
MVA	Mycorhizes à Vésicules Arbusculaires
NIES99	National Institute for Environmental Studies of Japan
NINEP	Ministère de l'Environnement et de la Protection de la nature
NPA	Nouvelle Politique Agricole
PAM	Programme Alimentaire Mondial
PAR	Photosynthetic Active Radiation
PF	Poids Frais
PIB	Produit Intérieur Brut
PS	Poids Sec
ROC	Receiver Operating Characteristic
SOD	Super-Oxyde Dismutase
UCAD	Université Cheikh Anta Diop de Dakar
UE	Union Européenne
UEMOA	Union Économique et Monétaire Ouest Africaine
UKMO-HADCM3	Hadley Centre for Climate prediction and Research, Met Office, United Kingdom
UNCCD	United Nation Convention to Combat Desertification

Resumé

Le présent travail a été mené dans une dynamique de recherche sur l'amélioration des espèces fruitières sous-utilisées. Dans les écosystèmes tropicaux, les espèces fruitières sauvages jouent de multiples rôles dans la conservation de la biodiversité et l'amélioration de la situation alimentaire et économique des populations rurales en générant des revenus par la commercialisation de leurs fruits et feuilles.

Le travail a consisté en l'étude éco-physiologique du tamarinier (*Tamarindus indica* L.) en milieu tropical aride. Son but a été de contribuer à la connaissance du fonctionnement hydrique du tamarinier, à l'identification de souches mycorhiziennes qui lui sont associées et à mieux comprendre son écologie. De manière spécifique, il a visé 4 objectifs spécifiques : (1) identifier les facteurs climatiques déterminant la distribution du tamarinier au Sénégal ; (2) évaluer la diversité mycorhizienne associée à la plante *in situ* au Sénégal ; (3) évaluer les effets d'une inoculation mycorhizienne sur les paramètres physiologiques des écotypes de tamarinier du Sénégal ; et (4) caractériser les mécanismes de gestion de l'eau du tamarinier *in situ*.

Pour atteindre ces objectifs, nous avons effectué des travaux sur le terrain pour la caractérisation du fonctionnement hydrique (chapitre 6) ; des essais ont été menés en serre et au laboratoire pour l'identification de souches mycorhiziennes associées au tamarinier au Sénégal et la caractérisation de leurs effets sur les paramètres physiologiques et de croissance de l'arbre (chapitre 4 et 5) ; et enfin, l'état du peuplement actuel a été évalué et prédit pour l'avenir (2020, 2050 et 2080) sur la base de paramètres climatiques en utilisant le modèle MAXENT (chapitre 3).

Il ressort de cette étude que :

- l'évitement (défini comme étant la capacité de la plante à maintenir un potentiel hydrique élevé en condition de déficit hydrique) serait le mécanisme physiologique principal du tamarinier utilisé dans son adaptation au stress hydrique. En effet, face à un début de stress hydrique, la plante procède à une baisse de son potentiel hydrique (de -3 à -3,5 MPa). En cas d'une sécheresse sévère et prolongée, la plante subit une réduction de la transpiration, marquée par une chute foliaire qui peut être modérée (< 50%) ou totale (> 80% du volume foliaire total) en fonction de la température moyenne du milieu. La consommation hydrique journalière a été calculée varier entre les valeurs de 0,3 à 0,6 mm.j⁻¹ (pendant la saison sèche chaude) et 3,2 à 6,9 mm.j⁻¹ pendant la saison des pluies. Par ailleurs, nous avons pu constater que le tamarinier a une bonne

(70 % à 80 %) capacité de récupération physiologique (aptitude des plantes à rétablir leur statut hydrique à un niveau d'alimentation normale et stable) mesurée et calculée en saison chaude humide. Cette plasticité physiologique baisse avec l'installation de la sécheresse pendant la saison sèche froide.

- Trois genres de champignons mycorhiziens à arbuscules (*Acaulospora*, *Glomus* et *Scutellospora*) ont été déterminés sur la base de leurs caractéristiques morphologiques sur les racines du tamarinier dans trois zones agro-écologiques (soudanien, soudano-sahélien et sahélien) au Sénégal. Ces résultats indiquent que *T. indica* a un large spectre d'association mycorhizienne. Un gradient de la fréquence de mycorhisation des racines des arbres a été observé suivant l'axe nord (zone sahélienne)/sud (zone soudanienne). Ainsi, on a pu observer une fréquence de mycorhisation de 11,17% des arbres en zone sahélienne statistiquement supérieure à celles des zones soudano-sahélienne (5,72%) et soudanienne (3,85%). En milieux contrôlés et au stade jeune, les résultats n'ont pas montré de différences significatives de réponse à une inoculation mycorhizienne (*Glomus mosseae*, *G. aggregatum*) entre les écotypes/provenances de tamarinier des différentes zones agro-écologiques du Sénégal. Par ailleurs, on a noté des différences significatives ($P < 0,05$) pour les variables morphologiques (diamètre au collet et hauteur des plants) et les paramètres éco-physiologiques (photosynthèse nette, conductance stomatique et efficacité d'utilisation de l'eau) entre les plants inoculés et les témoins. Ces résultats indiquent clairement que (i) la croissance du tamarinier est améliorée par son association au champignon mycorhizien du genre *Glomus*; et (ii) l'association des mycorhizes au tamarinier contribue à accroître sa capacité de résistance à la sécheresse.

- Les résultats obtenus pour la prédiction de la distribution du tamarinier au Sénégal par le modèle MAXENT, ont montré que la variation saisonnière de la température de l'air, la température maximale du mois le plus chaud, la précipitation du mois le plus arrosé et la précipitation du trimestre le plus arrosé, sont les variables climatiques les plus explicatives de la distribution actuelle du tamarinier au Sénégal. La température maximale au développement du tamarinier a été définie autour de 40°C. Au-delà de cette température, le développement du *T. indica* est négativement influencé. Les projections futures (2020, 2050 et 2080), montrent une réduction importante de la surface de la zone optimale de développement du tamarinier au Sénégal. Une disparition quasi-totale de la zone favorable au développement du tamarinier est prédite au Sénégal à l'horizon 2080. Les raisons avancées sont discutables et dépendent surtout des hypothèses énoncées : anthropiques (destruction des arbres par une pression élevée sur le bois) et climatiques (augmentation des températures de 2 à 6°C d'ici 2100).

Summary

The present work was conducted with the aim to improve wild underutilized fruit-bearing tree species. In tropical ecosystems, wild fruit trees play multiple roles in biodiversity conservation and guaranteeing food security besides income generation through marketing of fruits and other byproducts.

The present study involved characterization of some eco-physiological characteristics of tamarind (*Tamarindus indica* L.) in tropical arid environments. Its purpose was to (1) understand the strategies behind the water management mechanisms of *T. indica*; and (2) characterize the mycorrhizal diversity of the rhizosphere associated with tamarind *in situ*, in three agro-ecological zones of Senegal, besides understanding its ecology. Four specific objectives were associated with this study: (1) identification of the climatic factors determining the distribution of tamarind trees; (2) assessment of *in situ* mycorrhizal diversity associated with wild tamarinds stands in Senegal; (3) evaluation of the effects of mycorrhizal inoculation on a number of morphological and physiological parameters of different tamarind ecotypes from Senegal; and (4) characterization of mechanisms of water management of tamarind trees *in situ*.

To achieve these objectives, field work was conducted from May 2009 to September 2010 during which the water and tamarind plant relationships were characterized (Chapter 6). This was done *in situ* in two sites: one in Sahel zone (Niokhoul) and the second in the Sudano-Sahelian zone (Mbassis). At each site, three *T. indica* specimens were chosen (based on their DBH) for investigation. An experimental design was implemented to characterize the response of tamarind trees to water and climate over time. Experimental trials were also conducted in the greenhouse and laboratory from February 2007 to April 2010 using a factorial design with two factors (two mycorrhizae species and three tamarind ecotypes from the three agro-ecological zones of Senegal) in two water regime status (stressed and irrigated plants) with the aim to characterize their effects on physiological parameters and growth. Another experiment was carried out in the greenhouse on the soil taken from the tamarind tree areas, within each agro-ecological zone to identify the mycorrhizae associated with tamarind and to characterize the level of mycorrhizal dependence of tamarind trees *in situ* (Chapter 4 and 5). Finally, the current stand of tamarind population was evaluated using the transect method to predict its projected distribution based on climatic parameters using MAXENT model (Chapter 3). The following were basic findings of this study:

- Avoidance is the main physiological mechanism of tamarind in its adaptation to water stress. When tamarind faces drought stress, it shows a decrease in water potential in a range of -3 to -3.5 MPa. In case of

severe and prolonged drought, there was reduction of leaf transpiration marked by leaf drop that can be moderate (less than 50%) or complete (more than 80% drop of the total leaf volume from a single tree). Daily water consumption of tamarind was estimated to vary between 0.3 to 0.6 mm.d⁻¹ (during the hot dry season) and from 3.2 to 6.9 mm.d⁻¹ during the rainy season. Moreover, we found that tamarind has a good (70-80 %) physiological plasticity (capacity to regain an equilibrium water status). Physiological plasticity decreases with the onset of drought (cold dry season).

- Three types of arbuscular mycorrhizal fungi (*Acaulospora* spp., *Glomus* spp. and *Scutellospora* spp.) were found associated with tamarind (*T. indica*). These results indicate that *T. indica* has a wide spectrum of mycorrhizal association. Gradient of mycorrhisation frequency of trees was observed following the north (Sahel)/south (Sudan) axis. Frequency of trees mycorrhisation was around 11.17% in the Sahel region which was significantly higher than that of the Sudano-Sahel zone (5.72%) and the Sudan (3.85%). In controlled environments and in the seedling stage, results did not show significant differences in responses to mycorrhizal inoculation (*Glomus mosseae*, *G. aggregatum*) between ecotypes/provenances of tamarind within different agro-ecological zones of Senegal. Moreover, we noted significant differences ($P < 0.05$) for morphological variables (root collar diameter and plant height) and eco-physiological parameters (net photosynthesis, stomatal conductance and water use efficiency) between inoculated plants and controls. The latter results clearly indicate that (i) tamarind growth is enhanced by the presence of mycorrhizal fungi of the genus *Glomus* and (ii) mycorrhizal associations contributed significantly to improve tolerance of tamarind to drought stress.

- Results of the MAXENT model have shown that seasonal variations in air temperature, maximum temperature of the warmest month, precipitation during the wettest month and precipitation during the wettest quarter, were the most important climatic variables in explaining the actual distribution of tamarind in Senegal. The maximum temperature for the development of tamarind was found to be around 40°C, beyond which development of *T. indica* is highly affected. Future projections (2020, 2050 and 2080) show a significant reduction in the optimum area of development of tamarind in Senegal. An almost total disappearance of the potential area for the development of tamarind was predicted for Senegal by 2080. Causes for the latter are debatable and variable: anthropogenic (uses of wood inducing high pressure on the species) and climatic (by 2100, temperature is predicted to rise by 2° to 6°C in West Africa).

Samenvatting

Dit werk levert een bijdrage tot het onderzoek naar de verbetering van ondergewaardeerde tropische soorten. In tropische ecosystemen spelen wilde fruitsoorten een belangrijke rol voor de bescherming van de biodiversiteit, alsook bij de verbetering van de voedselzekerheid en economische positie van de rurale bevolking. Dit laatste wordt voornamelijk bewerkstelligd door het genereren van inkomsten via de verkoop van fruit en bladeren.

Deze thesis omvat een ecofysiologische studie van tamarinde (*Tamarindus indica*) in een droog, tropisch klimaat. Het doel was een bijdrage te leveren aan de kennis van de waterhuishouding van de tamarinde, aan de identificatie van de mycorrhiza geassocieerd met tamarinde en aan het begrijpen van zijn ecologie in het algemeen. Vier specifieke doelstellingen werden vooropgesteld: 1) identificatie van de klimatologische factoren die de verspreiding van tamarinde in Senegal bepalen; 2) evaluatie van de diversiteit aan mycorrhiza die aan de plant geassocieerd zijn *in situ* in Senegal; 3) evaluatie van het effect van mycorrhiza-occlusie op de fysiologische parameters van verschillende ecotypes van tamarinde in Senegal; en 4) karakterisatie van de waterhuishoudingsmechanismen van tamarinde *in situ*.

Er werd veldwerk uitgevoerd om de waterhuishouding van tamarinde te karakteriseren (hoofdstuk 6). Er werden proeven uitgevoerd in de serre en in het laboratorium om de mycorrhizastammen te identificeren die geassocieerd zijn met tamarinde in Senegal en om het effect van de mycorrhiza op de fysiologische kenmerken en de groei van de boom te karakteriseren (hoofdstuk 4 en 5). De huidige en voorspelde toekomstige populatiedichtheden (2020, 2050, 2080) werden bepaald op basis van klimaatsparameters en gebruik makend van het programma MAXENT (hoofdstuk 3). Uit deze studie blijkt het volgende:

- Het vermijdingsgedrag (in 1972 gedefinieerd door Levitt als de capaciteit van een plant om een zeker waterpotentiaal te behouden in condities gekenmerkt door watertekort) is het voornaamste fysiologisch mechanisme in de aanpassing van tamarinde aan waterstress. Indien tamarinde wordt geconfronteerd met waterstress reageert ze met een verlaging van haar waterpotentiaal (van -3 tot -3,5 MPa). Bij een ernstige en langdurige droogte vermindert de transpiratie wat zich uit in gematigde (<50%) tot totale (>80% van het totale bladvolume) bladval, afhankelijk van de gemiddelde omgevingstemperatuur. Het dagelijkse waterverbruik werd geschat op 0,3 tot 0,6 mm per dag tijdens het warme en droge seizoen, en op 3,2 tot 6,9 mm per dag tijdens het regenseizoen. Wij constateerden bovendien dat tamarinde een goede fysiologische herstelcapaciteit heeft (= mogelijkheid om terug te keren naar een stabiele waterhuishouding) tijdens het

warme en vochtige seizoenen (70 tot 80% recuperatiecapaciteit). Deze fysiologische plasticiteit daalt met de opkomst van het droge en koude seizoen.

- In drie agro-ecologische zones in Senegal (Soedanees, Soedano-Sahel en Sahel) werden op basis van morfologische kenmerken drie genera van arbusculaire mycorrhiza (*Acaulospora* spp., *Glomus* spp. en *Scutellospora* spp.) gekarakteriseerd op de tamanindewortels. De resultaten tonen aan dat *T. indica* een breed associatiespectrum heeft met de mycorrhiza. Langs de noord-zuid as (van de Sahel naar de Soedanese zone) werd een gradient geobserveerd in de frequentie van de mycorrhizatie. Er werd een statistisch hogere (11,17%) mycorrhizatie vastgesteld bij de bomen in de Sahel-zone in vergelijking met de mycorrhizatie bij de bomen in de Soedano-Sahel (5,72%) en de Soedanese zone (3,85 %). In gecontroleerde omstandigheden, en in een jong plantstadium, konden geen verschillen worden waargenomen tussen de effecten van een inoculatie met mycorrhiza (*Glomus mosseae*, *G. aggregatum*) bij de verschillende ecotypes/herkomsten van tamarinde uit de verschillende Senegalese agro-ecologische zones. Er werden echter wel statistische significante ($p < 0,05$) verschillen gevonden voor de morfologische variabelen (diameter op borsthoogte en hoogte van de bomen) en ecofysiologische parameters (netto fotosynthese, stomatische geleidbaarheid en watergebruiksefficiëntie) tussen de geïnoculeerde planten en de controles. De resultaten tonen duidelijk aan dat (i) de groei van tamarinde verbetert door de associatie met de mycorrhiza van het genus *Glomus*; en (ii) de associatie met de mycorrhiza de weerstand van tamarinde tegen droogtestress verhoogt.

De studie naar de voorspelde verspreiding van tamarinde in Senegal op basis van het MAXENT-model toonde aan dat de seizoensvariatie in de luchttemperatuur, de maximale temperatuur in de warmste maand, de neerslag in de natste maand en de neerslag in het natste trimester de huidige distributie van tamarinde in Senegal het best verklaren. De maximale temperatuur voor ontwikkeling van tamarinde bleek ongeveer 40°C. Boven deze temperatuur wordt de ontwikkeling sterk afgeremd en negatief beïnvloed. Voorspellingen omtrent het toekomstig klimaat (2020, 2050 en 2080) duiden op een sterke reductie in de oppervlakte van de optimale zone voor de ontwikkeling van tamarinde in Senegal. Er wordt voorspeld dat de gunstige zone voor de ontwikkeling van tamarinde in Senegal tegen 2080 quasi volledig zal verdwenen zijn. De verklaringen hiervoor zijn divers en de geformuleerde hypothesen zijn voorwerp van discussie: antropogeen (vernietiging van de bomen door een verhoogde druk op het bos) en klimatologisch (een verhoging van de gemiddelde temperatuur in west-Afrika van 2 tot mogelijk zelfs 6 °C tegen 2100).

Introduction générale

La croissance démographique et le changement climatique sont des facteurs qui pourraient bientôt ré-orienter la politique et la pratique agricoles au niveau mondial. En effet, la famine, la malnutrition et la pauvreté menacent toujours plus de 800 millions de personnes dans le monde (PAM, 2003 ; FAO, 2008). On estime par exemple, qu'en 2005, une personne mourait de faim toutes les 4 secondes (ce qui équivalait à environ 21 600 personnes par jour dans le monde, (PAM, 2003). Satisfaire les besoins en nourriture de ces populations est l'un des défis majeurs de l'humanité. En 2003, il a fallu mobiliser plus de 3 milliards de dollars des États-Unis - dont 1,8 milliards pour l'Afrique - sous forme d'aide alimentaire aux populations menacées par la famine. Ces besoins s'accroissent considérablement au rythme des catastrophes naturelles (cyclones, tsunamis, et sécheresses, apparition de nouveaux organismes nuisibles) et de l'apparition/continuation de conflits armés (Ba et Noba, 2001 ; PAM, 2003).

A l'instar d'autres pays du monde, dans un avenir proche, les pays d'Afrique et spécifiquement ceux au sud du Sahara, dépendront de plus en plus de leurs ressources naturelles pour leur approvisionnement en alimentation, fourrage, fibres, bois d'œuvre et de service, médicaments et autres.... L'Agenda 21 du Sommet de Rio de Janeiro stipule "qu'en 2025, 83% de la population globale - soit plus de 8,5 milliards de personnes - vivront dans les pays sous-développés. Pourtant, la capacité des ressources naturelles disponibles et des technologies à satisfaire la demande de cette population croissante en aliments et autres commodités demeure incertaine".

Pour faire face à ce défi majeur, il apparaît important de développer des systèmes d'exploitation et/ou de production agricole basés sur des ressources naturelles dites sauvages afin de satisfaire ces besoins sans cesse croissants. Les ressources naturelles et les écosystèmes qui y sont associés devront faire l'objet d'une utilisation plus rationnelle et durable pour garantir leur pérennité (Wright *et al.*, 1992; Ba et Noba, 2001; Grouzis et Akpo, 2006). En effet, comme l'affirme Faye (2005) (cité par Grouzis et Akpo, 2006), contrairement à ce qui s'est passé en Europe et à l'Occident, le développement agricole en Afrique devra se faire en préservant les ressources naturelles, et même, dans certains endroits, en restaurant ces ressources.

La contribution des espèces fruitières sous-utilisées à l'alimentation et la création de revenus des/aux populations [et en particulier celles au sud du Sahara] n'est plus à démontrer (Assogbadjo, 2006 ; Bowe,

2007). Des études récentes au Sénégal montrent une régression du couvert ligneux (Diagne, 2000) de 1 à 2% par an, y compris celui qui contient des espèces fruitières forestières comme *Ximenia americana*, *Adansonia digitata*, *Tamarindus indica*,... La densité des arbres du Sénégal dont la hauteur est ≥ 3 m a baissé d'un nombre de $10 \pm 0,3$ arbres ha^{-1} en 1954 à $7,8 \pm 0,3$ arbres ha^{-1} en 1989 ($P < 0,001$) (Gonzalez, 2001).

Le tamarinier (*Tamarindus indica* L.) figure parmi les espèces utiles et sauvages les plus menacées (Diallo, 2001). Au Sénégal, il fait partie de la cohorte des espèces végétales totalement ou partiellement protégées par la loi N°98/03 du 08 Janvier 1998, du code forestier Sénégalais.

Pour le cas spécifique du tamarinier, des travaux récents (au-delà du thème de cette monographie) ont reconstitué (sur la base de modèles tels que MAXENT) son aire de distribution à l'échelle mondiale. Ils démontrent que le tamarinier existait autrefois dans des zones aujourd'hui considérées désertiques comme la Tunisie (Bowe, 2007; El-Siddig *et al.*, 2006). Une tentative de régénération de peuplements de tamariniers *in situ* par la mise en défend semble donc possible en zone tropicale aride.

Le tamarinier est connu pour sa croissance végétative lente. En milieu aride, cette lenteur de croissance est encore plus marquée (effets dépressifs du déficit hydrique) (El-Siddig *et al.*, 2006). Il devient dès lors important de mieux comprendre son fonctionnement hydrique. Par ailleurs, des voies d'amélioration de sa vitesse de croissance et de son développement végétatif ont été explorées au travers de la promotion de son association aux mycorhizes (Ba *et al.*, 2001). L'application d'une mycorhisation à l'échelle de la pépinière semble être une voie importante voire même nécessaire pour l'amélioration de la croissance végétative initiale du tamarinier (Ba *et al.*, 2001 ; El-Siddig *et al.*, 2006).

Sur la base de ce qui précède, nous avons formulé les questions de recherche suivantes :

- 1- Quels sont les facteurs climatiques expliquant la distribution de l'espèce *Tamarindus indica* dans son aire de présence ? Autrement dit, quelles sont les variables environnementales les plus explicatives de la distribution du tamarinier ?
- 2- Quelles sont les souches mycorhiziennes associées *in situ* au tamarinier ?
- 3- Quels sont les effets d'une inoculation mycorhizienne (efficacité des souches) sur les paramètres de croissance et physiologiques des provenances du tamarinier au Sénégal ?
- 4- Quels sont les caractéristiques et mécanismes de gestion de l'eau de la plante ?

La présente recherche vise à contribuer à la connaissance du fonctionnement hydrique du tamarinier, à l'identification des souches mycorhiziennes qui lui sont associées et sur l'évaluation de leurs effets d'inoculation sur les différentes provenances de tamariniers au Sénégal, mais aussi à mieux comprendre son écologie. Plus spécifiquement, le chapitre 1 fait la synthèse des connaissances sur le milieu (Sénégal), et sur le tamarinier et ses mécanismes physiologiques ; les chapitres 2 et 3 abordent les questions d'identification des facteurs climatiques qui déterminent la distribution du tamarinier au Sénégal ; le chapitre 4 traite de la diversité mycorhizienne associée au tamarinier *in situ* au Sénégal ; le chapitre 5 présente les effets observés au stade jeune plant de l'association mycorhizienne sur les paramètres physiologiques de trois provenances du tamarinier au Sénégal ; le chapitre 6 donne les caractéristiques et mécanismes spécifiques de la gestion de l'eau (bilan hydrique) du tamarinier *in situ* ; et finalement, le chapitre 7 présente les principales conclusions auxquelles l'étude a abouti. Les contraintes et les limites de l'étude ont été formulées sous forme de recommandations pour les recherches futures. L'on notera notamment : l'étude sur la variabilité de la réponse à la tolérance au stress hydrique et l'étude de la diversité mycorhizienne basée principalement sur une identification moléculaire des souches mycorhiziennes.

Chapitre 1

Synthèse des connaissances.

1.1. Le milieu d'étude : le Sénégal

1.1.1 La situation géographique (www.gouv.sn)

Le Sénégal se situe à l'avancée la plus occidentale du continent africain dans l'Océan Atlantique, au confluent de l'Europe, de l'Afrique et des Amériques, et à un carrefour de plusieurs routes maritimes et aériennes. D'une superficie de 196,722 km², il est limité au nord par la Mauritanie, à l'est par le Mali, au sud par la République de Guinée et la République de la Guinée Bissau, du côté de la côte ouest par la Gambie et par l'Océan Atlantique sur une façade de 500 km. Dakar (550 km²), la capitale, est une presqu'île située à l'extrême ouest du pays.

1.1.2 Situation politique et économique (www.gouv.sn)

Le Sénégal est une république laïque et démocratique, dirigée par un Président de la République élu au suffrage universel, pour un mandat de cinq ans. Le pouvoir législatif est exercé par une Assemblée Nationale de 120 membres et le pouvoir judiciaire par les cours et tribunaux. Le Sénégal enregistre depuis 1995 une croissance économique moyenne annuelle de 5%, dans un contexte de maîtrise de l'inflation et de réduction des déficits publics. En s'appuyant sur une stratégie de développement du secteur privé conçue de manière consensuelle et sur la réalisation d'infrastructures de développement (routes, magasins de stockage, aménagement des périmètres irrigués, ...) financées grâce à des investissements massifs, le Sénégal travaille à porter ce taux de croissance annuelle à 7,5% dans les prochaines années.

Les principales productions du pays sont : les céréales (mil, sorgho), l'arachide, les produits de la mer et les minerais (phosphates, le fer, la tourbe et le gaz naturel). Les principaux partenaires économiques du Sénégal sont l'Union Européenne (France, Allemagne, Espagne), le Nigéria, la Côte d'Ivoire et les États-Unis pour les importations. Pour les exportations, on retrouve l'Union Européenne (France, Italie, Espagne), la Gambie et le Mali. Le Sénégal appartient à l'Union Économique et Monétaire Ouest Africaine (UEMOA), qui a comme monnaie commune le Franc CFA émis par la Banque Centrale des États de l'Afrique de l'Ouest (BCEAO). La parité du FCFA est fixe avec l'euro (1 euro = 655,957 F CFA) qui en assure la garantie.

Le tourisme constitue la deuxième ressource économique du Sénégal après la pêche. Les principaux sites et villages touristiques sont : l'Ile de Gorée, le Lac Rose, la ville historique de Saint-Louis, le Parc national de Niokolo Koba, le Parc des oiseaux de Djoudj, et les stations balnéaires de Saly Portudal et du Cap Skirring.

1.1.3 Le climat, la végétation et le relief

Le climat du Sénégal est du type sahélien, caractérisé par une saison des pluies d'une durée de 3 à 4 mois (Sarr *et al.*, 2005), et une saison sèche le reste de l'année (novembre à juin). Trois types de phénomènes atmosphériques déterminent le climat du Sénégal : l'anticyclone des Açores, la haute pression au nord de l'Afrique et l'anticyclone de Sainte-Hélène (Sarr *et al.*, 2005). Ils provoquent :

- ❖ l'alizé maritime, une masse d'air humide qui se dirige du nord au nord-ouest pendant la saison des pluies ;
- ❖ l'harmattan, qui se caractérise par une sécheresse liée à son long parcours continental et par des amplitudes thermiques très accusées pendant la saison sèche. Il souffle du continent vers l'océan ; et
- ❖ la mousson à l'arrivée des premières pluies (avril) qui est marquée par une faible amplitude thermique. D'une manière générale, les précipitations décroissent du sud vers le nord. La carte des isohyètes montre un glissement des isohyètes vers le sud entre les périodes 1941 – 1970 et 1971–2000 (Sarr *et al.*, 2005).

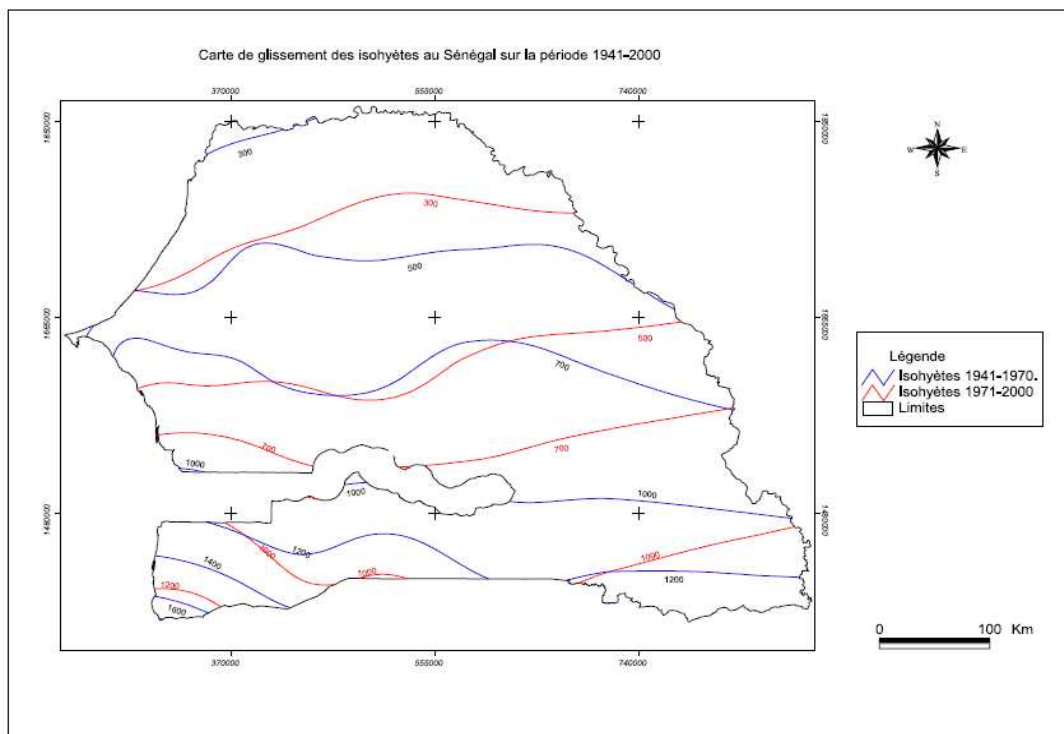


Figure 1.1: Carte de déplacement des isohyètes au Sénégal (Sarr *et al.*, 2005)

La figure 1.1, montre un glissement des isohyètes qui a été de l'ordre de 100 km dans la moitié nord et 70 km dans la moitié sud, si on passe de la période 1941-1970 (qui a été très pluvieuse) à la période 1971-2000 qui a été très déficitaire en pluies (Sarr *et al.*, 2005).

La température est en permanence assez élevée. Son évolution et sa distribution résulte de la conjonction de facteurs météorologiques et géographiques. Les minima thermiques sont atteints pendant le mois de janvier et les maxima pendant le mois de juillet (saison des pluies). Sur le littoral nord, les températures moyennes journalières sont modérées à travers l'année (16-30°C). Elles montent jusqu'à plus de 40°C dans la zone centre-est du Ferlo (Linguère, Matam) et s'approchent de 39°C à Tambacounda pendant la saison sèche et chaude de l'année (mars à juin).

La végétation du Sénégal peut être divisée en trois zones écologiques principales. En allant du nord au sud on reconnaît : la zone sahélienne, la zone soudano-sahélienne et la zone soudanienne (Sarr *et al.*, 2005 ; Grouzis et Akpo, 2006).

La zone sahélienne est comprise entre les isohyètes 150 mm et 500 mm. Le cœur de cette région se situe autour de l'isohyète 300 mm. Elle se situe dans la partie nord du Sénégal. Les toutes premières pluies saisonnières, qui arrivent généralement en juillet, transforment les paysages secs au préalable en étendues herbacées vertes et luxuriantes. Pendant 8 à 10 mois de saison sèche, la couverture herbacée disparaît du fait seulement du pâturage du bétail exposant ainsi des sols nus à l'érosion éolienne. Des plantes ligneuses sont généralement présentes dans les vastes étendues qui sont couvertes d'herbacés annuelles, leurs associations définissant les types de végétation prédominants dans la zone. Les types les plus courants sont les savanes arbustives (caractérisées par la seule présence d'arbustes parmi le tapis herbacé) et arborées (présence d'arbres et arbustes disséminés sur le tapis herbacé avec une hauteur des arbres se situant entre 8 et 12 m pour une densité du couvert de 25 à 35 %) (Grouzis et Akpo, 2006). Le couvert boisé excède rarement 6 à 8 mètres de haut. Le Sahel est le domaine du genre *Balanites (aegyptica)* et *Acacia*, représentées par quelques 12 espèces (Diouf, 1996 ; Sarr *et al.*, 2005).

La zone soudano-sahélienne se trouve au sud de la zone sahélienne et couvre environ les deux tiers du Sénégal central et méridional. Les types de végétation y sont les forêts arbustives (présence dominante d'arbustes) à arborées (présence marquée d'arbres clairsemés). La zone est comprise entre les isohyètes 500 et 900 mm et est centrée autour de l'isohyète 700 mm (Grouzis et Akpo, 2006 ; Sarr *et al.*, 2005). Elle est caractérisée par 5 à 6 mois de pluie dont juillet, août et septembre sont les plus arrosés. Comme pour la région sahélienne, les pluies coïncident avec les mois les plus chauds de l'été. La saison sèche s'étend sur 6 à 7 mois (novembre à mai). La littérature (Grouzis et Akpo, 2006) révèle qu'environ 80 espèces d'arbres ont été identifiées comme étant spécifiques à cette zone écologique.

Les espèces sahéliennes présentes dans la zone soudanienne disparaissent progressivement au fur et à mesure que l'on s'avance vers le cœur de la zone soudano-sahélienne (Le Houerou, 1997). Les arbres typiques de la zone sont *Cassia sieberiana*, *Daniellia oliveri*, *Khaya senegalensis*, *Sclerocarya birrea*, *Tamarindus indica*, *Diospyros mespiliformis*, *Adansonia digitata* et *Terminalia macroptera*.

On y rencontre aussi de nombreuses espèces de *Combretum* et d'*Acacia* (Diouf, 1996).

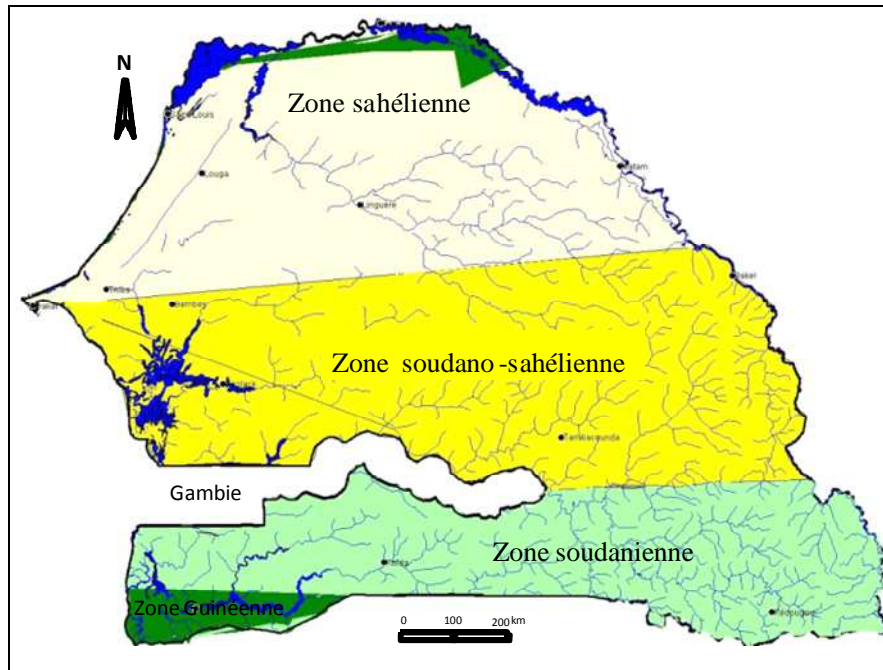


Figure 1.2: Carte agro-écologique du Sénégal effectuée sur la base du bilan hydrique (Sarr *et al.*, 2005)

L'occupation humaine a profondément modifié la composition et la structure de la végétation originale, en particulier dans le bassin arachidier. Des feux de brousse fréquents continuent de jouer un rôle important dans le maintien et le changement des différents types de végétations ligneuses de plus en plus clairsemées (Grouzis et Akpo, 2006 ; Sarr *et al.*, 2005).

La zone soudanienne se rencontre dans le sud du pays et est caractérisée par des forêts denses semi-persistantes. La superficie de ces dernières a été réduite à quelques communautés vestiges par une déforestation généralisée au bénéfice des cultures de riz, maïs, manioc et arachide. Elle prédomine dans les zones dont la pluviométrie annuelle moyenne dépasse 900 mm. Elle subit une saison sèche d'une durée variable de 6 à 7 mois.

Tableau 1.1 : Caractéristiques des zones agro-écologiques du Sénégal (Grouzis et Akpo, 2006)

Spécificités	Zone sahélienne	Zone soudano-sahélienne	Zone soudanienne
Climat	Aride	Semi-aride	Humide
Précipitations annuelles (mm)	200-400	400-600	600-900 à 1100
Évapotranspiration potentielle (mm/an)	2000	1800	1500
Longueur saison de croissance (jours)	30-90	90-125	120-190
Type de végétation	Savanes à Fabaceae et herbes annuelles	Savanes à Combrétaceae	Savanes arborées
Espèces ligneuses	<i>Acacia raddiana</i> , <i>A. senegal</i> , <i>Balanites aegyptiaca</i> , <i>Commiphora africana</i> .	<i>Combretum</i> spp. <i>Sclerocarya birrea</i> , <i>Acacia seyal</i> , <i>Diospyros mespiliformis</i> ...	<i>Parkia biglobosa</i> , <i>Diospyros mespiliformis</i> , <i>Mangifera indica</i>
Espèces herbacées	<i>Aristida mutabilis</i> , <i>Cenchrus biflorus</i> , <i>Schoenefeldia gracilis</i> , <i>Zornia glochidiata</i> ,...	<i>Andropogon pseudapricus</i> , <i>Loudetia togoensis</i> ...	<i>Andropogon gayanus</i> , <i>Hyptus suaveolens</i> ...
Utilisation des terres	Transhumance, culture du mil (<i>Pennisetum glaucum</i>).	Sédentarisation des animaux, culture de mil et sorgho (<i>Sorghum bicolor</i>)	Sédentarisation des animaux, culture du maïs (<i>Zea mays</i>) et du coton (<i>Gossypium</i> spp.)

1.1.4 La population

En 2010, la population du Sénégal était estimée à 12,7 millions d'habitants, soit une densité moyenne de 67 habitants au km² (www.statistiques-mondiales.com). Cette moyenne cache une répartition extrêmement inégale de la population, avec une opposition entre le sous-peuplement de l'est (avec des densités de l'ordre de 1 à 5 habitants/km²), et une forte concentration sur la côte (la densité de la région de Dakar est de

4 000 habitants/km²). Plusieurs groupes ethniques composent cette population sénégalaise. L'on y retrouve principalement et par ordre d'importance (Tableau 1.2) :

- ❖ Wolofs/Lébou (44,5%) ;
- ❖ Poular (25,2%) ;
- ❖ Sérère (13,8%) ; et
- ❖ Diola (5%).

Tableau 1.2 : Composition ethnique de la population du Sénégal

	Dakar	Pourcentage (%)	Autres villes	Pourcentage (%)	Total	Pourcentage (%)
Wolof/Lébou	1 108 642	47,5	924 231	46,4	4 643 985	44,5
Poular	456 193	19,6	396 409	19,9	2 624 706	25,3
Sérère	249 358	10,7	261 035	13,1	1 437 245	13,8
Diola	146 645	6,3	122 365	6,1	521 359	5
Manding/Sossé	89 246	3,8	109 157	5,5	411 682	3,9
Soninké	56 366	2,4	28 475	1,4	171 746	1,6
Autres sénégalais	154 147	6,6	137 056	6,9	472 050	4,5
Africains	49 018	2,1	7 630	0,4	100 805	1
Autres étrangers	18 403	0,8	4 104	0,2	25 249	0,2
ND	5 413	0,2	1 900	0,1	16 383	0,2
Total	2 333 429	100	1 992 362	100	10 425 208	100

ND = non déterminé : **Source** : *Direction de la prévision et de la statistique/Enquête sénégalaise auprès des ménages, 2004* (www.statistiques-mondiales.com)

1.2 La politique agricole

De nombreuses contraintes constituent une limite à l'agriculture sénégalaise : contraintes d'ordre économique (baisse du revenu réel des paysans ayant provoqué la réduction de l'utilisation des intrants agricoles, la sur-utilisation et la dégradation des terroirs) ; contraintes liées aux insuffisances et échecs des politiques agricoles

(accès au système de crédit institutionnel, disponibilité des intrants, problèmes fonciers, etc.) ; contraintes sociales ; mais surtout contraintes climatiques (faiblesse et variabilité de la pluviométrie). Tout ceci a pour conséquence une production aléatoire et une forte dépendance des populations vis-à-vis des produits forestiers comme compléments à la production agricole vivrière (Ndiaye *et al.*, 2002).

L'agriculture sénégalaise occupe 65 à 70% de la population active mais ne contribue qu'à hauteur de 20% au produit intérieur brut (PIB) (www.francophone-durable.org). Pourtant, le secteur bénéficie d'importantes potentialités. Sur les 19,7 millions d'hectares que comprend le pays, 3,8 millions sont cultivables avec 2,4 millions (63% du potentiel) qui sont effectivement cultivés (Dramé, 2002).

Les principales orientations de la politique agricole du Sénégal s'articulent autour du désengagement de l'État du secteur agricole et de l'implication accrue des opérateurs économiques privés (Dramé, 2002). Ces orientations devraient à terme permettre de relever les défis du développement agricole durable. Jusqu'à la fin des années 1960, la politique agricole était de type interventionniste (aide ponctuelle de l'État aux producteurs) et résultant à la mise en place de structures de promotion, de participation et de formation des populations rurales (Dramé, 2002). L'État avait le contrôle de tout le secteur agricole grâce notamment aux structures relais d'encadrement des ruraux. L'échec de l'agriculture étatiste associé au programme d'ajustement structurel (imposé par les bailleurs de fonds et les partenaires au développement) a conduit à la libéralisation du secteur agricole avec l'adoption à partir de 1984 de la Nouvelle Politique Agricole (NPA). Aujourd'hui, on suit une démarche à la fois libérale et interventionniste matérialisée par la loi d'orientation agro-sylvo-pastorale du 04 juin 2004 (www.gouv.sn). Cette initiative a été précédée par la loi nr 98/03 du 08 Janvier 1998, qui accorde une protection totale ou partielle à certaines espèces fruitières dites traditionnelles comme le tamarinier et le baobab.

1.3 Botanique, écologie et importance économique du tamarinier (*T. indica*)

1.3.1 Taxonomie

Le tamarinier (*Tamarindus indica* L. (synonymes. *T. occidentalis* Gaertn. ; *T. officinalis* Hook.)) est un arbre fruitier pérenne de la zone tropicale pouvant atteindre 20 à 30 m de hauteur (Morton, 1987 ; Diallo, 2001 ; Siddig *et al.*, 2006 ; Bowe, 2007). Il serait originaire de la zone tropicale africaine mais il a été noté que

l'ancêtre sauvage existerait en Inde, où il porte le nom de « *tamar hindi* » (du fait de ses fruits appelés « tamar » ou dattes en Inde).

Sa vaste distribution à travers le monde (Figure 1.4) lui confère plusieurs appellations qui puisent leurs racines dans l'anglais, l'espagnol et le portugais : *tamarindo* (espagnol/portugais), *tamarin* ou *tamarinier* (français), *tamarindizio* (italien), *mak – kharm* (Thaïlande), *tamarijn* (antillais), *ampil* ou *khous me* (Cambodge), *mak kham* (Laos) et *me* (Vietnam) (Morton, 1987 ; Diallo *et al.*, 2007). Du point de vue botanique, il appartient à la sous-branchement des angiospermes et à la classe des dicotylédones, sous classe des rosidae. Cette sous-classe comprend 18 ordres dont celui des Fabales à qui appartient la famille des Fabacées. Le tamarinier appartient à la famille des Fabacées, sous-famille des Caesalpinioïdées (Morton, 1987 ; Diallo *et al.*, 2007). Il est caractérisé par une couronne dense et large, et un tronc à écorce rugueuse, fissuré, grisâtre-brun. Il est la seule espèce dans le genre *Tamarindus* (El-Siddig *et al.*, 2006) :

Classe : *Magnoliopsida*

Sous-Classe : *Rosidae*

Ordre : *Fabales*

Classe : *Fabaceae*

Famille : *Fabacées*

Sous-Famille : *Caesalpinioideae*

Genre : *Tamarindus*

Espèce : *indica*

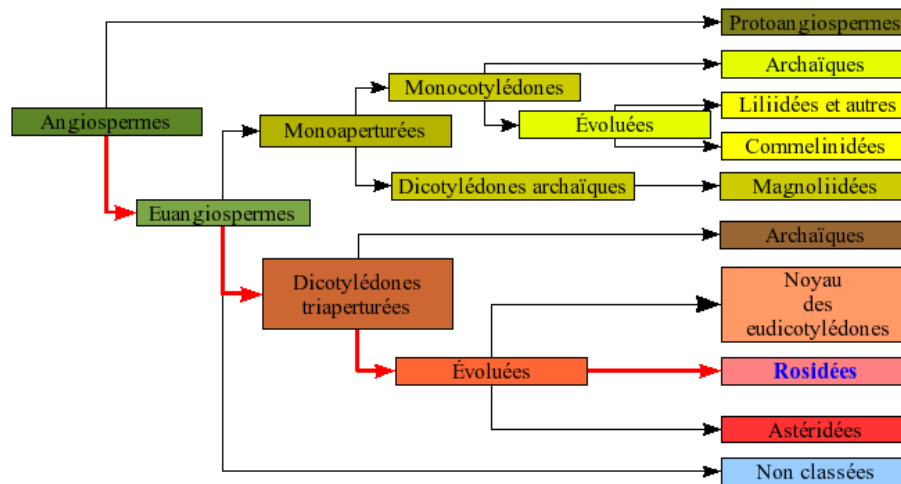


Figure 1.3: Arbre phylogénétique des angiospermes (systématique de MOBOT) (El-Siddig *et al.*, 2006)

1.3.2 La phytogéographie du tamarinier

Trois thèses sont avancées pour expliquer l'origine du tamarinier à travers le monde. Certains auteurs pensent qu'il serait originaire de l'Inde (Poupon et Chauwin, 1983 ; Bärtel, 1994 ; Wunderlin, 1998), alors que d'autres favorisent la thèse africaine (Grollier *et al.*, 1998). Enfin, pour certains auteurs (Aubréville, 1950 cité par Diallo *et al.*, 2007 ; Giffard (1974) cité par Siddig *et al.*, 2006 ; Von Maydell, 1990 ; Grovel, 1993), il serait originaire de Madagascar.

Certains auteurs pensent qu'il serait originaire des zones des savanes sèches de l'Afrique tropicale au vue d'une faible variabilité morphologique observée au sein de la population de cette zone (El-Siddig *et al.*, 2006). Cependant, l'espèce a été connue et cultivée en Égypte dès 400 ans avant Jésus Christ. Les premiers négociants arabes ont trouvé l'arbre probablement en Inde (Wunderlin, 1998). On suppose que ces marins et commerçants arabes ont apporté les graines de l'Asie du Sud-Est dans la période précédant les 400 ans avant Jésus Christ. Dans les sculptures indiennes de Brahmasamhita, l'arbre apparaît entre 1200 et 200 ans avant Jésus Christ (Bärtel, 1994 ; Wunderlin, 1998).

Le tamarinier couvre aujourd'hui une aire géographique vaste au niveau mondial, principalement dans les continents américain (la région centrale et latine) et asiatique (Inde) (Figure 1.4).

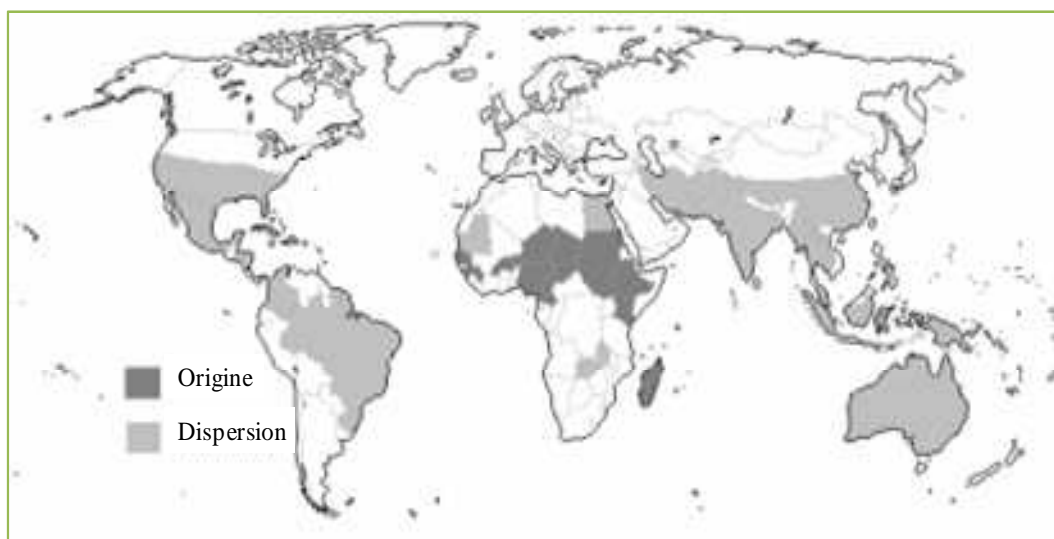


Figure 1.4: Aire de dispersion dans le monde et origine du tamarinier (El-Siddig *et al.*, 2006)

Sa culture s'est bien développée en Afrique où l'on observe quelques exploitations, mais les plus grands producteurs se retrouvent en Amérique (Puerto Rico, Mexique et Costa Rica) mais surtout en Asie (Thaïlande et l'Inde qui est le plus grand producteur mondial de fruits de tamarinier avec 300 000 t/an) (www.icraf.org).

Tableau 1.3 : État de la production actuelle et des importations du tamarinier dans le monde

Continent	Pays producteurs	Quantité produite (t/an)	Pays importateurs du tamarin
Asie	Inde	300. 000	Pakistan
	Thaïlande	140. 000	Pays arabes
Amérique	Costa Rica	220	Europe (UE)
	Mexique	37	Amérique du Nord
	Puerto Rico	23	(USA, Canada)

Source : www.icraf.org

En Afrique, l'aire de distribution du tamarinier se retrouve dans la partie au sud du Sahara qui s'étend du Sénégal à Djibouti et jusqu'à Madagascar. Il couvre la zone tropicale aride (Figure 1.5).

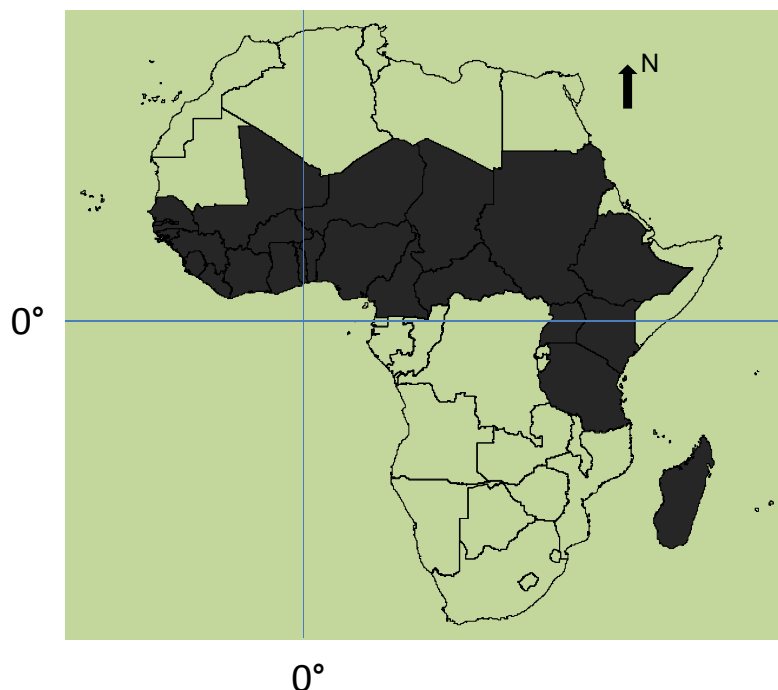


Figure 1.5: Aire de distribution du tamarinier en Afrique (El-Siddig *et al.*, 2006)

Certains pays africains ont affiché une volonté politique de la conservation et de la propagation du tamarinier au regard de son importance économique et de ses valeurs nutritionnelles reconnues (Burkina Faso, Cameroun, Tchad, Côte d'Ivoire, Guinée, Kenya, Nigéria et le Sénégal) (Diallo, 2001 ; Bowe, 2007 ; Bowe et Haq, 2010).

1.3.3 Phénologie et biologie de la reproduction de la plante

La phénologie

Le tamarinier est une plante à feuilles caduques. Il peut perdre jusqu'à 50% de sa feuillaison au cours de l'année et surtout pendant la saison sèche (dans des conditions extrêmes de déficit hydrique). La repousse foliaire a lieu en début de la saison des pluies. Les feuilles sont alternes et paripennées (7-15 cm de long) et composées de 10-18 paires de folioles de tailles variables [12-32 x 3-11 mm] et de forme oblong à étroit généralement ayant un apex pointu, tandis qu'elles sont arrondies à la base (El-Siddig *et al.*, 2006).

Floraison et fructification

Les fleurs sont généralement de petite taille (2,5 cm de diamètre) et de couleur jaune pâle ou rosâtre. Au stade de complète ouverture, elles comportent 4 sépales et 5 pétales. Les fruits sont indéhiscents généralement, incurvés ou veloutés (mesurant 10 à 18 cm) de couleur verte au stade immature avec la chair verte et fortement acide et des graines molles, blanchâtres, et sous-développées (Morton, 1987 ; Diallo, 2001 ; El-Siddig *et al.*, 2006 ; Bowe, 2007). Au stade de maturité commerciale, la chair est acidulée de couleur brune ou brun-rougeâtre ; la peau devient une coquille fragile et facile à casser, se déshydrate naturellement et puis s'individualise de la pâte collante incluse que constitue la chair, des fibres se prolongeant le long de la chair du fruit. Un fruit a généralement 1 à 12 graines (Photo 1.1) qui sont dures, de couleur rouge-brun, de taille 1,1 à 1,25 cm entourées d'une enveloppe parenchymateuse (El-Siddig *et al.*, 2006).

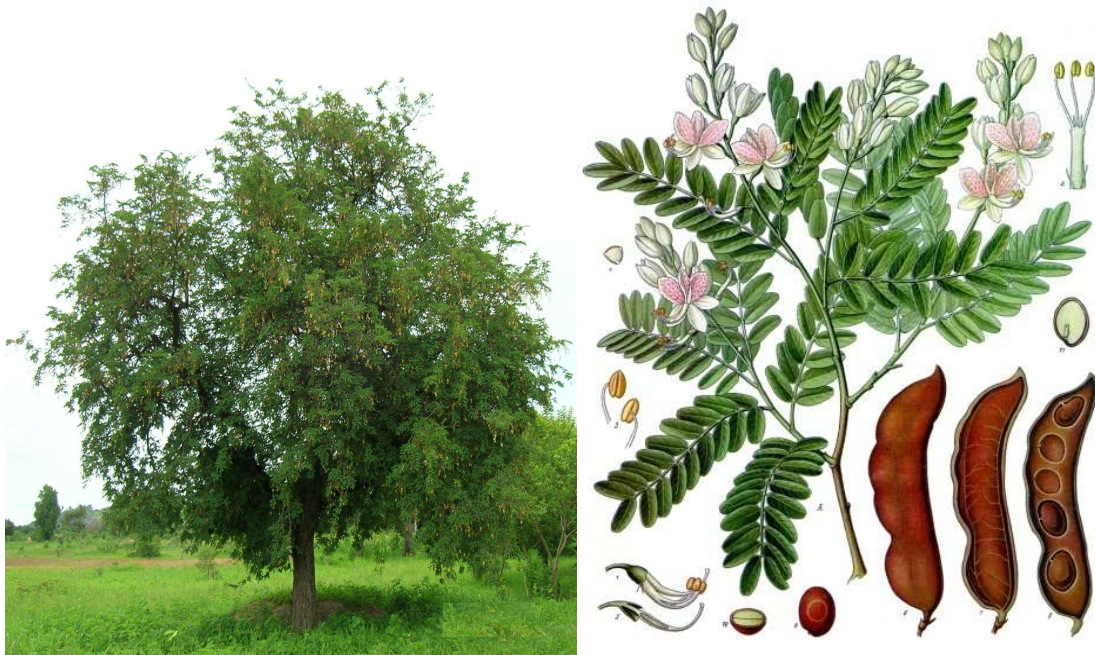


Photo 1.1 : Le tamarinier et schéma de ses organes reproducteurs (Bowe, 2007)

Très peu de connaissances existent sur le mode de pollinisation et de fructification du tamarinier. Ce que l'on sait c'est qu'il est protogynique (protérogynie : type d'hermaphrodisme caractérisé par la maturité des cellules femelles avant celle des cellules mâles), entomophile et à pollinisation croisée. L'autopollinisation a des conséquences sur le pool génétique de la plante. En effet, on attribue au tamarinier une plus forte variabilité inter-population qu'intra-population (Diallo, 2001). Le développement du bourgeon floral du tamarinier dure environ 20 jours (Diallo, 2001 ; El-Siddig *et al.*, 2006).

1.3.4 Utilisation et importance économique du tamarinier

On note plusieurs utilisations de l'espèce comme aliment, en pharmacopée et comme bois de service. Le fruit entre dans la préparation de plusieurs repas. C'est ainsi que, la pulpe du fruit, mélangée avec du sel, est un ingrédient essentiel de l'alimentation en Inde. En effet, la pulpe renferme 8-14% d'acide tartrique et 30-40% de sucre (Diallo, 2001). L'acidité est provoquée par l'acide tartrique, qui à la maturité du fruit ne disparaît pas, mais est transformé en sucre. Le tamarin est considéré comme un fruit simultanément acide et doux. Le fruit mûr du type doux est habituellement consommé frais, tandis que les fruits de type aigre (acide) sont transformés en jus, confiture, sirop et sucrerie (El-Siddig *et al.*, 2006).

Le fruit est commercialisé sur le marché international comme un fruit frais et sous forme de sirop ou entre dans la composition d'aliments divers. Le jus forme un ingrédient de la sauce « Worcestershire » (Angleterre) et a un contenu élevé en vitamine B (thiamine et niacine), carotène et vitamine C (Bowe, 2007). Les fleurs, feuilles et graines peuvent être mangées et sont préparées en plusieurs plats sous différentes formes.

Les graines du tamarinier sont également comestibles après trempage dans de l'eau et une ébullition pour enlever le péricarpe de la graine. La farine issue de ces graines de tamarinier est souvent utilisée pour la préparation de gâteaux et de pain. Les graines grillées sont prétendues être supérieures à celles de l'arachide. En élevage, le feuillage a une valeur élevée comme fourrage, bien que rarement taillé à cette fin parce qu'elle affecte les rendements en fruits. Dans les états du sud de l'Inde, les graines cuites du tamarinier sont données aux animaux de trait.

En apiculture, les fleurs sont considérées meilleures que celles des autres plantes mellifères (*Psidium guajava*, *Theobroma cacao*) pour la production de miel de deuxième grade couleur foncée. En énergie, le tamarinier fournit du bois de chauffage, la qualité du bois est jugée très bonne pour la menuiserie. En effet, ayant une densité de 0,8-0,9 g.m⁻³, il est utilisé pour la fabrication de mortiers et d'outils agricoles. En Amérique du Nord, le bois du tamarinier est commercialisé sous le nom d'acajou de Madeira. Les graines sont assimilées à celles du lin (*Linum usitatissimum*), utilisées dans la fabrication de peintures et de vernis et pour en faire de l'huile pour allumer des lampes. Les feuilles et l'écorce sont riches en tanin.

En médecine, l'écorce est tonifiante et astringente ; sa cendre est recommandée comme digestif. Incorporée à des lotions, l'écorce peut être employée contre les ulcères et les éruptions cutanées. Elle peut également être administrée comme décoction contre l'asthme et comme fébrifuge. Les extraits de feuilles ont montré une activité antioxydante dans le foie, et sont un ingrédient dans la composition d'un sucre utilisé pour combattre les maladies cardiaques (Diallo, 2001 ; Bowe, 2007). On a également noté l'utilisation des jeunes feuilles et de l'écorce dans le traitement du rhumatisme, blessures et des inflammations. La pulpe est utilisée dans le massage tandis que les graines entrent dans le traitement des diarrhées.

La couronne du tamarinier offre un excellent ombrage ce qui en fait un arbre de palabres, des consultations rituelles des notables des villages en Afrique au sud du Sahara. En raison de la résistance à la cassure et de son système racinaire étendu, il est utilisé comme brise vent dans des exploitations de production fruitière (vergers de manguiers, agrumes, etc.). La composition en éléments nutritifs des parties comestibles est consignée dans le tableau 1.4.

Tableau 1.4 : Valeur nutritive par 100 g de la partie comestible du tamarinier à l'état sec.

Éléments nutritifs	Pulpe du fruit	Jeune feuilles	Fleurs
Calories (kcal)	115	traces	traces
Protéines (g)	3,10	5,8	0,45
Matière grasse (g)	0,1	2,1	1,54
Fibres (g)	5,6	1,9	1,5
Hydrates de carbone (g)	67,4	18,2	traces
Sucres convertibles (g)	30-41	traces	traces
Cendres (g)	2,9 g	1,5	0,72
Calcium (mg)	35-170	101	35,5
Magnésium	traces	71	traces
Phosphore (mg)	54-110	140	45,6
Fer (mg)	1,3-10,9	5,2	1,5
Cuivre (mg)	traces	2,09	traces
Chlore (mg)	traces	94	traces
Soufre (mg)	traces	63	traces
Sodium (mg)	24	traces	traces
Potassium (mg)	375	traces	traces
Vitamine A (mg)	15 I.U.	250	0,31
Thiamine (mg)	0,16	0,24	0,072
Riboflavine (mg)	0,07	0,17	0,148
Niacine (mg)	0,6-0,7	4,1	1,14
Acide ascorbique (mg)	0,7-3,0	3,0	13,8
Acide oxalique (mg)	traces	196	traces
Acide tartrique (mg)	8-23,8	traces	traces

Source : De Caluwé *et al.*, 2010

Au plan environnemental, le tamarinier a été employé dans des projets de séquestration de carbone. Dans de tels systèmes agro-forestiers, le tamarinier est planté en association avec certaines espèces fruitières et forestières (Bowe, 2007).

1.3.5 Quelques caractéristiques éco-physiologiques du tamarinier

Le *T. indica* tolère plusieurs types de sol et des conditions climatiques variables (Diallo, 2001 ; Bowe, 2007 ; Diallo *et al.*, 2007). Cependant, il est le plus souvent signalé dans des savanes boisées à arborées à faible altitude (c'est le cas du bassin arachidier sénégalais : villages de Soumbène, Fimela, Ndibiding, etc.) (Ndiaye, communication personnelle). En effet, le tamarinier préfère les zones arides et la prairie boisée, et se rencontre le long des cours d'eau en zone sèche. Il tolère également l'environnement salin (zone côtière) et le climat de mousson (El-Siddig *et al.*, 2006).

De manière générale, le tamarinier ne supporte pas le gel même si les sujets adultes présentent une meilleure résistance au froid que ceux du manguier (El-Siddig *et al.*, 2006 ; Diallo *et al.*, 2007 ; Bowe et Haq, 2010). Dans des zones de production de blé (comme le Pakistan), la bonne production de ce dernier est selon les paysans locaux, prédite par la grosseur des fruits du tamarinier : les fruits d'une taille plus importante indiqueraient une bonne saison de pluie passée (Mojeremane et Tshwenyane, 2004).

L'eau et la plante

Le tamarinier se développe dans des zones où les précipitations annuelles moyennes sont bien réparties et varient de 500-1500 mm/an (El-Siddig *et al.*, 2006). La précipitation minimale se situerait autour de 250 mm/an (Mojeremane et Tshwenyane, 2004 ; El-Siddig *et al.*, 2006 ; Bowe, 2007). Dans les zones de pluviométrie faible (300-500 mm), les arbres sont habituellement observés dans des zones avec une nappe phréatique superficielle ou le long de cours d'eau (par exemple la région de Gnibi au Sénégal en zone du Sahel). Une humidité relative faible (< 30%) est notée être importante pour un bon développement du fruit, indépendamment des précipitations annuelles totales. L'arbre produit plus de fruits une fois qu'il a été soumis à une période sèche assez longue (6-8 mois) au cours de l'année et précédent la floraison. Sa résistance à ce climat aride serait due à son système racinaire pivotant et profond (El-Siddig *et al.*, 2006). Le tamarinier peut tolérer des précipitations jusqu'à 4000 mm/an si le sol est bien drainé. Cependant, on note qu'il ne fleurit pas dans de telles conditions (Diallo, 2001).

La température

Le tamarinier est une espèce essentiellement tropicale dont les exigences thermiques se situeraient autour de 9-20°C pour les minima et 33-37°C pour les maxima (Morton, 1987 ; Diallo, 2001 ; Mojeremane et Tshwenyane, 2004 ; El-Siddig *et al.*, 2006 ; Bowe, 2007 ; Bowe et Haq, 2010).

1.4 La notion de déficit hydrique et la symbiose mycorhizienne

1.4.1 Le concept de sécheresse et du déficit hydrique des plantes

Définitions

a) La sécheresse

Le mot sécheresse a trait à une période au cours de laquelle un net déséquilibre hydrologique est observé dans le sol en raison de la rareté des précipitations, provoquant une évaporation totale des réserves d'eau et un tarissement des puits, tout en entraînant des dégâts de plusieurs natures aux cultures (Deblonde et Ledent, 2000). La sécheresse agronomique est distincte de la sécheresse climatique qui correspond à une période de diminution des pluies par rapport à un régime hydrique autour duquel l'environnement local et l'activité humaine se sont stabilisés. La sécheresse agronomique est définie par Daie (1988) cité par Deblonde et Ledent (2000) comme une situation environnementale caractérisée par un déficit hydrique dans le sol, la plante et l'atmosphère provoquant une baisse de productivité végétale.

De manière générale, une période de sécheresse peut être considérée comme le résultat de fluctuations au niveau des pressions climatiques. On reconnaît plusieurs causes d'un tel déficit hydrique tel que des pics de chaleur, une hygrométrie faible, une forte insolation, la salinité ou le gel (Daie, 1988 cité par Deblonde et Ledent, 2000). Les plantes, du fait évident de leur immobilité, ont développé au cours de leur évolution de nombreux mécanismes de tolérance à la sécheresse. Ces mécanismes s'expriment à différents niveaux d'organisation, à l'échelle de la plante entière, de l'organe ou de la cellule.

Au Sahel, une sécheresse progressive sévit depuis 1968 et se traduit par une réduction de 20 à 40% de la longueur de la saison pluvieuse et une baisse du volume des précipitations dites normales de 15 à 40% (UNCCD, 2005 ; Ouédraogo, 2005). Dans cette région, ce sont les précipitations irrégulières et leur prévision

peu fiable qui déterminent les niveaux des rendements agricoles et le degré de sécurité alimentaire pour la grande majorité des populations. Les déficits hydriques enregistrés ont entraîné une réduction de la production primaire et une modification de la structure du couvert végétal. La grande sécheresse de 1968 à 1973, par exemple, a provoqué une perte totale de 600 000 t/an sur la récolte des céréales au Sahel (ISNAR, 1996). Au Sahel, la sécheresse de 1997, avec un déficit pluviométrique moyen de 30% par rapport à 1998 (année de bonne pluviométrie), a entraîné une baisse des rendements des céréales moyenne de 43% au Burkina Faso, au Niger et au Sénégal (FAOSTAT, 2005).

b) Typologie des stratégies d'adaptation au déficit hydrique

L'adaptation des plantes au manque d'eau est un phénomène largement décrit (Levitt, 1972 cité par Turner *et al.*, 2001), mais qui reste toutefois complexe. Cette complexité est expliquée par la présence de l'interaction de plusieurs mécanismes, opérant à différents niveaux d'organisation de la plante et utilisant des modifications morphologiques, physiologiques et biochimiques. De nombreux auteurs ont tenté de comprendre les mécanismes mis en jeu par les plantes en réponse à un déficit hydrique (Turner *et al.*, 2001 ; Chaves et Oliveira, 2004 ; Blum, 2005 ; Pang *et al.*, 2011 ; Schmidt *et al.*, 2011). Ces auteurs ont diversement classé les mécanismes d'adaptation des plantes à la sécheresse. La classification généralement acceptée est celle de Levitt (1980) cité par Turner *et al.* (2001) qui distingue principalement trois mécanismes d'adaptation : l'esquive, l'évitement et la tolérance.

❖ L'esquive

L'esquive est un phénomène par lequel les plantes bouclent leur cycle végétal productif durant la saison humide avant le début de la saison sèche. Cette stratégie permet à la plante de réduire ou d'annuler les effets de la contrainte hydrique en évitant qu'ils ne se produisent au cours du cycle et en particulier au cours d'une phase sensible. Ces plantes qui échappent aux conditions de sécheresse sont appelées *drought escapers*. Constatant que la durée de la saison pluvieuse en Afrique diminuait, les sélectionneurs ont au départ cherché à mettre au point des variétés précoces qui esquivent la sécheresse (Annerose, 1990 ; Cayenne et Scott, 2011 ; Pang *et al.*, 2011).

❖ **L'évitement**

L'évitement est la capacité qu'ont certaines espèces végétales (*drought avoiders*) à maintenir un potentiel hydrique élevé en conditions de déficit hydrique par deux processus : une diminution des pertes d'eau et/ou une augmentation de l'absorption de l'eau. La réduction des pertes d'eau se fait par une diminution de la surface foliaire, la fermeture stomatique, ou encore la transformation des feuilles en épines ou en écailles (cas des sclérophytes), ou couverture des stomates et des cuticules (Turner *et al.*, 2001).

❖ **La tolérance**

La tolérance confère aux plantes la capacité à maintenir l'intégrité fonctionnelle et structurale de leurs tissus lorsque ceux-ci se déshydratent. La notion de tolérance est fondamentalement une propriété intrinsèque du protoplasme et des organites cellulaires à supporter sans dommage une dessiccation plus ou moins complète (Vasquez *et al.*, 1990 ; Pham Thi *et al.*, 1990 ; Cayenne et Scott, 2011). Les principaux mécanismes mis en jeu sont l'ajustement osmotique et la tolérance protoplasmique. L'ajustement osmotique permet lors d'un abaissement du potentiel hydrique, le maintien de la turgescence par une accumulation active au niveau symplasmique de certains solutés (sucres, acides aminés, acides organiques, ...), assurant ainsi une protection des membranes et des systèmes enzymatiques (Pham Thi *et al.*, 1990 ; Costa-França *et al.*, 2000 ; Pang *et al.*, 2011 ; Schmidt *et al.*, 2011).

La tolérance à la sécheresse résulte de plusieurs facteurs intrinsèques (gènes) de la plante s'exprimant à plusieurs niveaux de son fonctionnement (Hall, 2004). Par ailleurs, le tamarinier a le privilège de pouvoir établir une endosymbiose mycorhizienne, qui joue un rôle très important et améliore sa nutrition hydrominérale (El-Siddig *et al.*, 2006).

1.4.2 La symbiose mycorhizienne

Le mot mycorhize est d'origine grecque et traduit la collaboration entre un champignon (*myco*) et les racines (*rhize*) d'une plante. Il fut proposé, à l'origine, par le phytopathologiste allemand Franck en 1885 (Manga, 2005 ; Ashwani *et al.*, 2010). Historiquement, l'association symbiotique plante-champignon mycorhizien est le résultat d'une longue évolution datant de l'apparition des plantes terrestres (Brundrett, 2002 ; Manga, 2005). Les mycorhizes forment des associations durables entre des racines de végétaux et le mycélium

filamenteux d'un nombre de champignons telluriques (Brundrett, 2002 ; Ashwani *et al.*, 2010 ; Arafat et Abdel, 2011).

Il s'agit d'une union mutualiste basée sur des échanges bénéfiques entre les deux partenaires. Celle-ci se traduit souvent chez les plantes mycorhisées par une meilleure compétitivité et une meilleure capacité à tolérer les stress environnementaux (Vlek *et al.*, 1996; Ashwani *et al.*, 2010 ; Castillo *et al.*, 2011). C'est grâce à leur association avec certains champignons que les plantes ont réussi à survivre dans des milieux offrant peu d'humidité et de nutriments (Manga, 2005). On distingue plusieurs types d'associations mycorhiziennes basés sur le partenaire fongique impliqué dans la symbiose (Brundrett, 2002 ; Harley et Smith, 1983 ; Miller et Jastrow, 1992). Les deux principaux types de mycorhizes caractérisés par une morphologie et une anatomie propres, et par leur position par rapport à la plante hôte sont les ectomycorhizes (ECM), et les endomycorhizes ou mycorhizes à vésicules et à arbuscules (MVA) (Ducousso, 1991 ; Ashwani *et al.*, 2010 ; Castillo *et al.*, 2011).

Les endomycorhizes se caractérisent par l'absence de manteau fongique autour de la racine. Elles sont fréquentes et très répandues, et concernent environ 80% des espèces végétales (Heijden *et al.*, 1998 ; Manga, 2005). On les rencontre essentiellement chez les plantes herbacées et chez quelques espèces ligneuses, telles que le peuplier et l'eucalyptus (Brundrett, 2002 ; Ba *et al.*, 2001). Les champignons formant les endomycorhizes sont des champignons inférieurs (Phycomycètes) qui appartiennent à la famille des Endogonacées (Zygomycètes). Au contact de la cellule racinaire, l'hyphe forme un appressorium. Le mycélium pénètre dans les cellules racinaires, il franchit les parois et repousse le plasmalemme des cellules-hôtes sans le traverser. Les hyphes passent ensuite de cellule à cellule et progressent également dans les méats. Dans les cellules corticales, le champignon développe des arbuscules et dans la plupart des cas, des vésicules qui *in fine* colonisent la racine. (Taylor et Alexander, 2005).

Les ectotrophes, ou ectomycorhizes, sont des associations où le mycélium progresse entre les cellules du cortex racinaire pour former un réseau intercellulaire appelé le réseau de Hartig (Read et Perez-Moreno, 2003). Les champignons ectomycorhiziens, ascomycètes ou basidiomycètes, sont associés surtout à des espèces ligneuses de familles telles que les Myrtacées, les Pinacées, les Fabacées, les Fagacées, les Tiliacées, les Ulmacées et les Salicacées (Taylor et Alexander, 2005). Les arbres qui dépendent de cette symbiose ne représentent pas plus que 3% des taxa végétaux, mais ils constituent les essences dominantes des forêts des régions boréales, tempérées et montagneuses (Vasiliauskas *et al.*, 2007).

Les champignons ectomycorhiziens regroupent des ascomycètes (truffes) et basidiomycètes (amanites, chanterelles, cortinaires), et les champignons imparfaits (zygomycètes). Le mycélium progresse entre les cellules corticales mais ne pénètre pas dans les cellules vivantes. L'ectomycorhize se concrétise chez la plupart des végétaux ligneux par la formation de tissus spécialisés (manchon fongique pseudoparenchymateux appelé réseau intercellulaire de Hartig).

Certains auteurs (Lekberg *et al.*, 2007 ; Rosendahl, 2007) distinguent une troisième classe des mycorhizes appelée ectoendomycorhize. Cette classe se définit comme une forme intermédiaire entre les endo et les ectomycorhizes. Les ectoendomycorhizes ont l'apparence d'ectomycorhizes : elles sont caractérisées à la fois par un manteau fongique (parfois très réduit) entourant les racines et par la pénétration du champignon à l'intérieur des cellules du cortex racinaire, sous forme de pelotons ou d'hyphes très courtes.

1.4.3 Classification des champignons mycorhiziens arbusculaires (MVA)

Les champignons mycorhiziens à arbuscules représentent les micro-organismes les plus abondants de notre écosystème terrestre. Ils forment des associations symbiotiques avec la plupart des plantes terrestres et se retrouvent dans presque tous les systèmes, de végétation à partir des régions sub-polaires, dans les forêts tropicales humides, et même dans certains écosystèmes aquatiques. Ils forment une symbiose unique avec les racines de la plupart des plantes terrestres, et leur succès évolutif en dépit d'être asexuée remet en question certains points de vue des biologistes sur leur évolution. Les analyses moléculaires et des études de matériel fossile ont montré que les champignons mycorhiziens auraient leur origine avec les premières plantes terrestres, et la symbiose a peut-être joué un rôle essentiel pour l'adaptation des plantes à l'environnement terrestre dans le temps passé (Schüßler *et al.*, 2001 ; Rosendahl, 2007 ; Ashwani *et al.*, 2010).

La première monographie taxonomique des champignons mycorhiziens a été publiée en 1974 par Gerdemann et Trappe (1974). Les clés de description que l'on retrouve sur la page web INVAM (<http://invam.caf.wvu.edu>), fourni par Joe Morton, ont servi de référence pour la nomenclature des espèces par des chercheurs à travers le monde. Les descriptions sont basées sur la variation des caractères morphologiques (Schüßler *et al.*, 2001 ; Rosendahl, 2007).

Les. Sur la base de caractéristiques morphologiques et moléculaires, les Gloméromycètes constituent une classe unique des champignons mycorhiziens ayant quatre ordres, 13 familles et 19 genres identifiés à savoir :

Acaulospora, Ambispora, Archaeospora, Cetraspora, Dentiscutata, Diversispora, Entrophospora, Fuscitata, Geosiphon, Gigaspora, Glomus, Intraspora, Kuklospora, Otospora, Pacispora, Paraglomus, Racocetra, Scutellospora et Quatunica comprenant plus de 200 espèces des champignons mycorrhiziens à arbuscules (Schüßler *et al.*, 2001 ; Rosendahl, 2007 ; Manoharachary *et al.*, 2010).

Les champignons mycorrhiziens à arbuscules étaient auparavant regroupés parmi la classe des Zygomycètes (Schüßler *et al.*, 2001 ; Manoharachary *et al.*, 2010), mais les études moléculaires suggèrent qu'ils aient leur propre embranchement (Schüßler *et al.*, 2001 ; Rosendahl, 2007). L'affinité des Zygomycètes a été basée sur une interprétation des spores en tant que azygospores (zygote formé sans fusion nucléaire), qui sont des zygosporos avec un seul gamétange (structure vivante capable de se reproduire). Plus tard, les spores ont été considérées comme un sporange (organe spécialisé qui est le siège de la formation des spores) dans lesquels les spores se développent à partir d'une seule spore. La ressemblance (similarité) des spores à d'autres structures fongiques connus n'a jamais été établie, et des études récentes montrent que la classe des Zygomycètes est polyphylétique (groupe d'êtres vivants n'ayant pas d'ancêtre commun direct ; leur ancêtre commun est donc situé hors du groupe qui est en fait constitué de sous-groupes d'êtres dont les ancêtres communs sont distincts les uns des autres). À l'heure actuelle les Gloméromycètes n'ont pas d'affinité évidente à d'autres groupes phylogénétiques majeurs dans les champignons (Schüßler *et al.*, 2001 ; Rosendahl, 2007). L'interprétation des ressemblances entre les spores Gloméromycètes et d'autres structures fongiques est encore compliquée par le fait que les spores des Gloméromycètes, entre eux peuvent, représenter différentes structures morphologiques et fonctionnelles. Chez certaines espèces de *Glomus* tels que *G. intraradices*, la structure de la paroi de la spore est simple, tandis que les spores des *Scutellospora* spp. peuvent avoir plusieurs parois intérieures membraneuses et développer un bouclier de germination complexe. La constatation des espèces dimorphes (différence morphologique) avec deux *Glomus* et *Acaulospora* suggère en outre que toutes les spores des Gloméromycètes peuvent ne pas représenter des structures homologues (Schüßler *et al.*, 2001 ; Colard *et al.*, 2007 ; Corradi *et al.*, 2007 ; Rosendahl, 2007 ; Manoharachary *et al.*, 2010)

1.4.4 Caractéristiques de quelques genres des glomales (MVA)

Le genre *Glomus* est caractérisé par des spores qui prennent naissance à la base d'un hyphes en forme de colonne (Morton et Benny, 1990 cité par Walker et Schüßler, 2004). Trois types d'occlusion sont observés

chez les espèces du genre *Glomus*. La germination se fait par l'émergence d'un nouvel hyphé à travers un tube de germination qui traverse directement la paroi de la spore (Schüßler *et al.*, 2001 ; Brundrett, 2002 ; Dalpé et Declerck, 2002). Les spores sont solitaires, très souvent sphériques et rarement ovoïdes, et de couleur jaune pâle à jaune foncée, bien qu'il existe aussi des formes de couleur jaune à jaune brunâtre. Elles sont constituées de deux parois distinctes. La paroi interne comporte deux couches : une couche externe de 1,6 à 2,4 μm d'épaisseur et une seconde couche d'environ 0,8 μm d'épaisseur (Brundrett, 2004 ; Diallo, 1998 ; Walker *et al.*, 2007).

Dans le genre *Acaulospora*, il existe une évolution morphologique continue entre les spores reliées à un point d'attache identique à celui de *Glomus*, celles rattachées à un pédicelle et enfin, les spores produites à l'extrémité d'un court collet. Les spores sont de forme sphérique à ovoïde, hyaline à jaune pâle et avec un diamètre de 56 à 68 μm . Elles ont un aspect luisant du fait de la présence d'un corps globulaire hyalin et sont reliées à des saccules sporifères en position terminale (Walker et Sanders, 1986 ; Diallo, 1998 ; Walker et Schüßler, 2004).

Le genre *Gigaspora* est caractérisé par des spores qui se différencient par des parois internes flexibles (Diallo, 1998 ; Waples et Gaggioti, 2006). Les cellules auxiliaires sont disposées selon des figures géométriques bien déterminées. Les tubes de germination proviennent d'une couche verruqueuse en contact avec le cytoplasme de la spore (Walker et Schüßler, 2004). Les spores sont solitaires, sphériques à ovoïde de couleur souvent jaune à orange, et de diamètre variable (148 à 368 μm) (Diallo, 1998 ; Walker et Schüßler, 2004).

Au niveau du *Scutellospora* ; les spores se différencient des autres au moins par une paroi interne flexible composée de deux couches jointives (Walker et Sanders, 1986 ; Diallo, 1998). Les cellules auxiliaires présentent une surface rugueuse (Diallo, 1998 ; Waples et Gaggioti, 2006). La germination se fait à partir des tubes de germination qui émergent du bouclier de germination. Ce bouclier de forme circulaire à oblongue est étroitement associé à la paroi interne flexible (Schüßler *et al.*, 2001 ; Brundrett, 2004). Les spores sont solitaires, très souvent de couleur variable, blanc crème à jaune pâle à noire, et de 260 à 400 μm de diamètre (Diallo, 1998 ; Brundrett, 2004).

1.4.5 Intérêt de la symbiose mycorhizienne

Les effets bénéfiques des champignons MVA sur les plantes sont largement discutés par divers auteurs (Ruiz-Lozano et Azcón, 2000 ; Read et Perez-Moreno, 2003 ; Meddich *et al.*, 2004). On note l'amélioration de l'alimentation hydrique et minérale (phosphore, potassium, azote, cuivre, zinc et soufre) quand les plantes sont associées aux mycorhizes (Strullu et Plenchette, 1991 ; Dalpé, 1998 ; Meddich *et al.*, 2004 ; Read et Perez-Moreno, 2003). En outre, les mycorhizes améliorent la structure du sol par la formation d'agrégats (Strullu et Plenchette, 1991 ; Cayenne et Scott, 2011).

L'augmentation de la résistance à la sécheresse des plantes grâce à l'infection mycorhizienne se ferait à travers plusieurs mécanismes : l'amélioration de l'alimentation hydrominérale, la régulation de la conductance stomatique en réponse à des signaux hormonaux (Diallo, 1998 ; Meddich *et al.*, 2004 ; Ramanankierama *et al.*, 2007), la réduction du potentiel osmotique foliaire par un maintien de la turgescence conséquent à l'amélioration de l'alimentation hydrique (Davies *et al.*, 1993 ; Cayenne et Scott, 2011 ; Ashwani *et al.*, 2011) et entraînant une incidence positive sur l'activité photosynthétique (Sanchez-Diaz *et al.*, 1990).

La plante fournit au champignon mycorhizien des sucres (les hexoses) (Read et Perez-Moreno, 2003). La plante est ainsi une source de concentration en sucres (hexoses) qui permet leur diffusion passive vers le champignon. Dans certains cas, il est estimé que les champignons mycorhiziens consomment jusqu'à 40% des produits de la photosynthèse de leur hôte (Sanchez-Diaz *et al.*, 1990 ; Davies *et al.*, 1993 ; Diallo, 1998) sans toutefois avoir d'incidence négative sur les paramètres de croissance et de développement de la plante hôte.

On note également le rôle important des mycorhizes arbusculaires dans la protection contre les pathogènes des plantes. La résistance accrue des plantes mycorhisées contre certains parasites racinaires appartenant aux genres fongiques *Phytophthora*, *Fusarium*, *Pythium*, *Rhizoctonia*, *Sclerotium*, *Verticillium* et *Aphanomyces* et aux nématodes des genres *Rotylenchus*, *Pratylenchus* et *Meloidogyne* (Waples et Gaggioti, 2006) permet d'envisager dans certains cas une réduction de l'apport de fongicides et de nématicides, et de réduire d'autant l'accumulation de ces derniers dans l'environnement agricole. Chez la banane, la mycorhisation par des champignons MVA a permis une réduction significative de plus de 64% des dommages causés par *Cosmopolites sordidus* (charançon) (Davies *et al.*, 1993 ; Smith *et al.*, 2004). En outre, la présence de

l'endophyte dans les racines réduit de 74% la pénétration de *Radopholus similis* (nématode) dans les racines (Sanchez-Diaz *et al.*, 1990).

En conclusion, ce chapitre a permis de faire une connaissance sur le milieu de l'étude (caractéristiques climatiques, écologiques et la population). En outre, il a permis de mieux connaître le tamarinier au plan botanique et de ses multiples usages. Il aborde aussi les notions de stress hydrique et de mycorhisation qui sont des facteurs importants pour comprendre le développement du tamarinier en milieu aride comme celui du Sénégal.

Chapitre 2

**Notions de distribution, densité et
déterminisme écologique des
espèces végétales.**

2.1 Introduction

Dans les pays tropicaux, l'intérêt des plantes sous-utilisées pour l'alimentation des populations rurales est reconnu par beaucoup de chercheurs (Buchmann *et al.*, 2009 ; De Caluwé *et al.*, 2010 ; Termote *et al.*, 2010a ; Termote *et al.*, 2010a). En Afrique occidentale, environ 350 espèces végétales de ce type ont ainsi été recensées et décrites (Baumer, 1995). A l'opposé, 4% de la forêt dense est perdu chaque année. Si les espèces les plus connues et les plus couramment utilisées font déjà l'objet d'une attention particulière sous diverses formes (maintien dans les champs de culture, en jardin de case, haies vives, parcs, etc.), les taxons moins connus pour leur utilité sont fréquemment abattus pour faire place aux cultures industrielles, plus rentables (Harrison, 1991). L'augmentation graduelle des contraintes climatiques par le passé a amené à considérer le Sahara comme un milieu aride à l'échelle continentale (Le Houerou, 1997). Ce changement s'est accompagné par une forme d'adaptation et de disparition des espèces biologiques qui y vivent (végétales et animales). Ce constat fait que la faune et la flore saharienne actuelle constitue un enjeu majeur pour la conservation et son développement durable (Le Houerou, 1997 ; Ribot, 2007).

Au Sénégal, un bilan diagnostique effectué par le gouvernement national en 1984 et actualisé en 2002 (MINEP, 2006) a fait apparaître que l'agriculture nationale ne couvrait que 40% des besoins céréaliers du pays (Ribot, 2007). Pour répondre aux besoins alimentaires et améliorer leurs revenus, les populations se sont de plus en plus orientées vers l'exploitation et la commercialisation de produits non ligneux de la forêt (fruits, gommages, huiles, etc.) (Ribot, 2007).

La part des produits de cueillette dans l'alimentation des populations est très mal connue (en général) et certainement très sous-évaluée (Termote *et al.*, 2010b). Dans la zone du Ferlo sénégalais (nord du pays), par exemple, la moitié des plantes qui y poussent donnent des produits consommables. Parmi les espèces les plus prisées par les populations, on peut citer le *Tamarindus indica*, *Adansonia digitata* (le baobab) et *Zizyphus mauritiana* (le jujubier). Au niveau de la consommation, les données de 2001 à 2004 montrent que la région de Tambacounda fournit à elle seule 80% de la part de la consommation du tamarinier au Sénégal (Ribot, 2007).

Dans le bassin arachidier du Sénégal, le nombre d'espèces couramment consommées avoisinerait la centaine (Ribot, 1999). Leurs modes de consommation restent très variés, condiment pour les sauces, fruits, aliments de disette et produits commercialisables (Termote *et al.*, 2010a ; Termote *et al.*, 2010b).

Compte tenu de la faible productivité des formations ligneuses sahéliennes d'une part et de la nécessité de satisfaire les besoins alimentaires des populations d'autre part, il est urgent d'améliorer la production et la productivité des principales espèces forestières fruitières afin d'augmenter les revenus des populations. Cette voie de recherche-développement nécessite au préalable la connaissance du potentiel physiologique et génétique des peuplements, ainsi que les zones propices de croissance de ces différentes espèces ligneuses (Ndiaye *et al.*, 2002 ; De Caluwé *et al.*, 2010 ; Termote *et al.*, 2010b).

Le tamarinier au Sénégal est un arbre fruitier à plusieurs usages, le fruit récolté est consommé sous différentes formes (jus, dans la sauce) (voir chapitre 1) ; alors que le bois est utilisé pour faire du charbon. En outre, il est craint pour ses effets jugés maléfiques (hébergeant des *gins* ou esprits maléfiques) par certains groupes ethniques comme les wolofs, sérères, etc. Cette situation contribue à sa protection. On observe néanmoins une dégradation progressive des peuplements du tamarinier suivant un axe nord-sud du fait probable des aléas climatiques et/ou anthropiques. Des poches de peuplements reliques composées de sujets très âgés constituent la limite supérieure de la zone d'existence du tamarinier au Sénégal (Ndiaye *et al.*, 2002).

2.2 Quelques facteurs qui contribuent à la dégradation des espèces ligneuses forestières en zone tropicale africaine

2.2.1 Les prélèvements

La dégradation des écosystèmes arides est souvent liée à deux facteurs : le changement climatique et les activités humaines. Le premier est considéré comme inéluctable à l'échelle du temps. La végétation des zones arides est adaptée à ce type de changements, les effets de ce dernier sur la disparition d'espèces sont généralement limités (Anthelme *et al.*, 2006). En revanche, l'impact des activités humaines (l'élevage et la mise en utilisation des terres cultivables) sur la végétation reste à définir sur le court et long terme. Ces activités sont susceptibles d'être à l'origine des modifications majeures du couvert végétal et donc des ressources naturelles vivantes.

Au Sénégal, la consommation du bois de feu (comme tel ou en charbon) de la ville de Dakar a été chiffrée à 2000 tonnes en 1996 (Ribot, 1999). Or, le tamarinier constitue l'un des principaux bois de feu transformé en charbon au Sénégal (Ribot, 1999 ; Ndiaye *et al.*, 2002). Cette situation parmi d'autres, justifie la protection de cette espèce. En effet les prélèvements des espèces végétales ligneuses à usages domestiques constituent les principales actions anthropiques majeures néfastes aux espèces végétales en zone sahélienne.

2.2.2 Les facteurs du climat

Les facteurs du climat agissent de manière combinés sur la dégradation de l'environnement. L'étude du peuplement végétal actuel du Sahel montre une diversité qui résulte surtout des interactions complexes des facteurs climatiques dans le passé. Les facteurs essentiels du climat sont le rythme des pluies, associé à leurs variations spatio-temporelles, et la température (Anthelme *et al.*, 2006). La pluviométrie reste marquée au sud du Sahara (cas du Sénégal) par la réduction des quantités annuelles des averses. On observe alors une translation progressive des isohyètes plus basses vers les zones situées plus au sud autrefois plus arrosées. C'est ainsi que dans la zone soudano-sahélienne de l'Afrique de l'Ouest, les précipitations annuelles moyennes ont fortement et continuellement décliné au cours des dernières décennies. Deux périodes de sécheresse majeure ont frappé la région, avec des années sèches plus marquées en 1972-1973 et 1983-1984 (Sarr *et al.*, 2005).

Au-delà de cette rareté des pluies, l'intensité de la pluie (hauteur exprimée en millimètres par unité de temps) est l'un des principaux paramètres qui induisent l'érosion. A Garoua (nord du Cameroun), sur la période de 1991-1994, 60% des pluies étaient agressives et présentaient une intensité supérieure à 40 mm/h, d'où des phénomènes d'engorgement et de ruissellement néfastes aux formations végétales (Vallée *et al.*, 1996). Dans cette même région, les températures sont élevées, surtout pendant la saison des pluies. Nulle part elles ne sont modérées par l'altitude (Vallée *et al.*, 1996). Aucune autre région semi-aride à pluviosité annuelle moyenne similaire, ne connaît une évapotranspiration potentielle (ETP) aussi élevée (Anthelme *et al.*, 2006 ; Breman et Kessler, 1995 ; Vallée *et al.*, 1996). Pendant la saison sèche, le taux d'humidité atmosphérique dans cette zone sahélienne nord est très bas (20%), mais augmente régulièrement dans les mois précédant l'arrivée de la saison des pluies, à l'approche de la zone de convergence intertropicale (Baumer, 1995).

2.3 Le changement climatique et incidence sur l'écologie des végétaux

Les êtres vivants dans leur écosystème sont assujettis aux effets conjugués de l'environnement. Ces facteurs pris individuellement ont des effets variables néfastes et dépressifs sur l'expression de leur potentiel génétique. La réponse adaptative des espèces vis-à-vis des facteurs écologiques constitue leur déterminisme écologique (Guisan et Zimmermann, 2000). Ceci revient en écologie adaptative d'évaluer la part de la contribution des facteurs ou groupes de facteurs dans "le comportement de l'espèce". Le développement très récent de programmes informatiques de modélisation, permet de mesurer le poids de certains paramètres écologiques pour pouvoir expliquer un phénomène observé (distribution, regroupement, taille, etc.) (Olivier et Wotherspoon, 2005 ; Bowe, 2007). Cependant, comme certains travaux scientifiques l'ont démontré ; la dynamique de chaque espèce (population) peut être à la fois déterministe (prédictible) et stochastique (non prédictible) du fait de l'action simultanée de certains facteurs (Lande *et al.*, 1997). Ces facteurs se traduisent par une faible possibilité de prédiction de leurs impacts écologiques sur le comportement des espèces vivantes.

2.3.1 La notion de peuplement et de sa distribution

Une réflexion sur les concepts biologiques et écologiques en relation avec la notion de population a conduit à redéfinir la population comme étant un ensemble d'individus d'une même espèce occupant une niche dans une biocénose déterminée (Lande *et al.*, 1997). En tant que structure dissipative (opérant dans un environnement), la population possède deux caractéristiques qui sont absentes chez l'individu : (1) la continuité dans le temps (reproduction) ; et (2) l'aptitude au changement (l'adaptation). Ce sont en effets ces particularités spécifiques qui déterminent certaines des caractéristiques de l'espèce (facteurs de distribution et exigence climatique) et conduisent à un regroupement en peuplements et/ou sous-espèces. En effet, un peuplement de tamarinier est sous-entendu ici comme une population d'arbres caractérisée par une structure et une composition homogène sur un espace déterminé. Il est le résultat des facteurs naturels (écologiques) mais aussi de facteurs anthropiques.

2.3.2 Modélisation de la distribution des espèces vivantes

La biodiversité joue un rôle pivot dans le maintien et le renforcement de la sécurité alimentaire et des moyens de subsistance (Termote *et al.*, 2010a ; Termote *et al.*, 2010b). Cependant, elle est de plus en plus menacée

par les effets du changement climatique. Pouvoir prédire dans cet environnement sans cesse changeant des zones de production probable et future d'espèces encore sous-utilisées (comme le *T. indica*) contribue à une gestion plus durable et plus fondée de ces ressources naturelles. Depuis longtemps, les paysans se sont investis au choix des zones de production des espèces cultivées, ceci en observant le sol et/ou les conditions climatiques (pluviométrie) entre autres pour une éventuelle extension de leur aire de culture. De nos jours, diverses techniques de modélisation de la distribution des espèces ont été développées, basées essentiellement sur des estimations mathématiques des paramètres climatiques (températures, pluviométrie, humidité relative) et des exigences climatiques des espèces dans les milieux où elles sont présentes (Guisan et Zimmermann, 2000 ; Elith *et al.*, 2006 ; Buermann *et al.*, 2008).

Modèle simplifié (linéaire)

Très souvent nous voulons savoir si deux événements sont liés pour prédire ce qui pourrait advenir sous différentes circonstances (futur). Dans un graphe du type X-Y, nous pouvons prédire la valeur de Y pour n'importe quelle valeur de X si nous avons l'équation du type linéaire qui lie X et Y. C'est cela l'idée générale de l'analyse de la régression (Phillips *et al.*, 2006).

Modèle non linéaire (logistique)

Une pléthore de méthodes a été développée pour la modélisation de la distribution des espèces, qui varient suivant la prise en compte ou non de la présence de l'espèce (Elith *et al.*, 2006). Des approches statistiques ont été appliquées à la distribution des espèces dont certaines font appel à des analyses de régression, des équations d'ordination, des analyses factorielles et/ou des analyses discriminantes. Récemment, des outils tels que les algorithmes génériques et l'entropie maximum ont été développés (Bowe, 2007 ; Elith *et al.*, 2006 ; Phillips *et al.*, 2006). Ces deux types de modèles ont été conçus sur la base des données de présence de l'espèce (niche écologique).

Les modèles linéaires ou non (*General Linear Model*), fort de leur robustesse fondée sur des calculs statistiques non paramétriques, combinent les calculs mathématiques du type linéaire, quadratique et/ou cubique (Austin, 2002 ; Bowe et Haq, 2010). Quelques-uns d'entre eux (Mars-COM, BRT et MAXENT Entropy) se sont révélés plus fiables et plus robustes que les modèles à algorithme générique (Elith *et al.*, 2006 ; Phillips *et al.*, 2006 ; Buermann *et al.*, 2008). Ces modèles de distribution sont utilisés aussi bien pour

des recherches en sciences animales (Olivier et Wotherspoon, 2005) que pour des études d'espèces végétales aquatiques (Willey *et al.*, 2003). La majorité des techniques développées pour modéliser des données de présence est basée sur des techniques dites enveloppes et de distance. L'analyse des facteurs de niche écologique (ENFA) corrige les limites des techniques dites enveloppes par la prise en compte des interactions entre les variables environnementales et les densités observées de l'espèce concernée sur le terrain (Bowe, 2007).

Ces nouvelles techniques de projection des zones propices de présence des espèces s'utilisent dans diverses disciplines de la science (biologie analytique, écologie, épidémiologie et gestion des espèces envahissantes) (Phillips *et al.*, 2006). Du fait de certains facteurs importants (barrières géographiques de dispersion, la salinité, la dynamique de l'eau, la fertilité du sol, les interactions biotiques et l'action anthropique, les systèmes/pratiques culturels, la politique agricole) qui peuvent avoir des interactions possibles avec la distribution réelle des espèces, très peu d'espèces existent dans des milieux qui coïncident avec leur niche écologique (Phillips *et al.*, 2006). Ces paramètres interagissent de manière complexe sur le déterminisme de l'espèce (Bowe, 2007 ; Buermann *et al.*, 2008). Malgré cette limite, la modélisation des phénomènes biologiques a connu plusieurs applications. Ainsi, beaucoup de travaux ont été menés sur la modélisation des réponses agro-morphologiques en fonction des données climatiques mais surtout, la modélisation a été utilisée pour la prédiction des rendements.

Les modèles empiriques jusque là concernent beaucoup plus les plantes cultivées. Ils sont basés sur des analyses de régression multiples entre les effets climatiques, le rendement et/ou les itinéraires techniques (Bowe, 2007). Ces modèles n'ont pas encore été testés sur des espèces ligneuses peu étudiées comme le tamarinier.

Pour la plupart des espèces forestières, le manque de données quantitatives sur les paramètres de croissance et la productivité [le rendement moyen] explique en partie l'inexistence de modèles de croissance pour ces espèces. Par contre, des modèles d'estimation de la production de ligneux fruitiers tels le mangui ont bel et bien été développés (Bowe, 2007).

La prédiction des zones de présence de *T. indica* au niveau mondial a été réalisée par Bowe (2007) à partir des données obtenues dans des herbiers nationaux et autres structures de conservation du matériel végétal. Des travaux similaires sont conduits sur les papayers (*Carica papaya* L.) et le cherimoya (*Annona cherimola*

Mill.) (Scheldman *et al.*, 2006). Le modèle ENFA (*Ecological Niche Factor Analysis*) utilisé a montré une grande variabilité des réponses du tamarinier aux facteurs climatiques en fonction des zones de peuplement (Bowe, 2007). Ceci serait dû au niveau de domestication de l'espèce qui varie d'une région à l'autre. Le modèle n'a pu faire ressortir la variabilité intra-régionale à une échelle beaucoup plus petite (pays) (Elith *et al.*, 2006).

Dans le cadre de la présente étude, nous allons considérer que tous les autres paramètres sociologiques/anthropiques (pratiques culturelles, importance sociale de l'espèce), physiques (relief, pente du sol) et biologiques (le pH du sol, photopériodisme et maladies) restent invariables. Ainsi, sur la base des seuls paramètres climatiques, nous allons prédire les zones propices de peuplement de l'espèce *Tamarindus indica* et estimer la contribution individuelle de ces paramètres climatiques au niveau du Sénégal.

Chapitre 3

Densité et distribution du tamarinier (*Tamarindus indica* L.) au Sénégal, évaluation du potentiel d'adaptation au changement climatique.

Adapté à partir de : Bourou, S., Bowe, C., Diouf, M.
& Van Damme, P. (2012). Ecological and human
impacts on stand density and distribution of tamarind
(*Tamarindus indica* L.) in Senegal, African Journal of
Ecology, doi:10.1111/j.1365-2028.2012.01319.x

3.1 Introduction

L'intensification de l'agriculture et la baisse sans cesse de la pluviométrie annuelle ont conduit aux changements des conditions écologiques en Afrique de l'Ouest (Wittig *et al.*, 2007). Les modèles de prédiction de la production des cultures montrent que le changement climatique entraînera des baisses de rendement de l'arachide, du sorgho et de l'igname dans la région vers les années 2030 (Lobell *et al.*, 2008). Une préoccupation croissante existe concernant l'effet du changement climatique et le mode d'utilisation des terres sur le comportement des espèces semi-sauvages fruitières dans le système agro-forestier (Maranz, 2009). Les parcs agro-forestiers jouent un rôle important dans les systèmes de production agricole en Afrique de l'Ouest (Boffa, 1999). Les espèces d'arbres fruitiers tels que les *Tamarindus indica*, *Adansonia digitata*, *Ziziphus mauritiana* ou *Vitellaria paradoxa*, sont importantes pour le maintien et/ou l'amélioration du revenu économique des communautés rurales (Boffa, 1999 ; Dawson *et al.*, 2009 ; Termote *et al.*, 2010a). Cependant, elles subissent les effets néfastes du changement climatique dans le temps et dans l'espace.

Une récente étude révèle plus de 250 utilisations du tamarinier (*T. indica* L.) en Afrique de l'Ouest (Buchmann *et al.*, 2009). Au Sénégal, le tamarinier est utilisé principalement pour ses fruits, mais il est aussi une plante médicinale importante (Havinga *et al.*, 2010) et une source de bois précieux (Morton, 1987 ; El-Siddig *et al.*, 2006). La pulpe du fruit a une forte teneur en vitamine B et est consommée à l'état frais ou transformée en confiture, chutney, jus ou en bonbons. Les fleurs, les feuilles et les graines sont comestibles et utilisées dans plusieurs plats (voir chapitre 1). Le système racinaire étendu du tamarinier contribuerait à sa tolérance à la sécheresse (El-Siddig *et al.*, 2006).

Jusqu'à présent, peu d'intérêt a été accordé à des études qui mettent l'accent sur l'interaction de l'environnement avec les espèces du système agro-forestier africain. En raison de l'importance de ces espèces, des études éco-géographiques doivent être effectuées afin d'identifier leur potentiel d'adaptation à l'environnement et contribuer ainsi au processus de leur domestication (Bowe, 2007 ; Bowe et Haq, 2010). Les modèles de distribution des espèces sont des outils qui ont été développés pour évaluer l'impact potentiel du changement climatique sur ces espèces, dans la planification de systèmes de conservation, le mode de gestion des espèces envahissantes et les estimations du rendement et de la production (Hijmans et Graham, 2006 ; Phillips *et al.*, 2006 ; Beaumont *et al.*, 2008 ; Elith *et al.*, 2006).

MAXENT est un programme qui utilise le principe de l'entropie maximale avec une formulation mathématique simple et précise qui a été appliquée avec succès à la modélisation de la distribution de plusieurs espèces biologiques (Phillips *et al.*, 2006 ; Elith *et al.*, 2006). MAXENT utilise des données environnementales (climatiques) pour obtenir des résultats sous forme de probabilités d'occurrence ou de présence des espèces. Ces données de l'environnement sont appliquées à des données géo-référencées de l'espèce sous étude pour construire la distribution géographique de l'espèce en probabilité d'occurrence (Elith *et al.*, 2006). MAXENT a montré de meilleurs résultats de prédiction de la distribution des espèces que d'autres modèles tels GAM (*General Additive Model*) et GLM (*General Linear Model*) (Elith *et al.*, 2006).

Peterson *et al.* (1999) et Peterson et Holt (2003) ont remarqué que l'utilisation de modèles de niche écologique pour prédire la répartition future d'espèces en fonction d'un changement climatique, dépend fondamentalement de la connaissance de la stabilité actuelle de ces niches, de leur étendue géographique et de la répartition de toutes les espèces au fil du temps. Si la niche écologique d'une espèce est uniforme pour toute sa population, la modélisation de sa distribution à une large échelle (mondiale) est précise, en intégrant la courbe de réponse complète de l'espèce et la prévision du futur climat (Estrada-Pena *et al.*, 2006). Bowe (2007) et Bowe et Haq (2010) ont constaté que la niche écologique du tamarinier semble varier dans son aire de répartition au niveau mondial. Des modèles régionaux ont été identifiés comme offrant alors une meilleure prédiction de ces types d'espèces (Bowe, 2007). Dawson *et al.* (2009) ont souligné l'effet de la densité du peuplement sur le pool génétique des espèces fruitières tropicales. Une faible densité peut conduire à une faible variabilité génétique et induire une érosion génétique ayant pour conséquence la diminution de la productivité et la capacité d'adaptation à des environnements changeants. Une préoccupation supplémentaire concerne le fait que, lorsque ces espèces sont cultivées, elles deviennent souvent tributaires des effets de l'isolement qui sont des sources d'érosion génétique (Dawson *et al.*, 2009).

Dans le cadre de la présente étude, notre objectif est d'évaluer la densité actuelle et la distribution future du tamarinier au niveau régional (Sénégal). L'hypothèse énoncée est que le changement climatique observé au Sénégal (mobilité des courbes des isohyètes, augmentation des températures moyennes de l'air, etc.) peut influencer la présence/distribution du tamarinier actuel et futur. La densité du peuplement de l'espèce et sa distribution seront alors des facteurs importants dans la capacité d'adaptation à l'environnement et pour les programmes de conservation, de domestication et de gestion des espèces végétales.

3.2 Méthodologie

3.2.1 Sources des données

Echantillonnage et collecte des données de la densité

Des points de présence du tamarinier et la densité (nombre d'arbres par km²) autour de 30 villages ont été relevés et mesurés à travers le Sénégal. Le Sénégal a trois principales zones agro-écologiques : (1) la zone soudanienne dans le sud ; (2) la zone soudano-sahélienne au centre ; et (3) la zone sahélienne dans le nord (Grouzis et Akpo, 2006, Sarr *et al.*, 2005) (Figure 3.1).

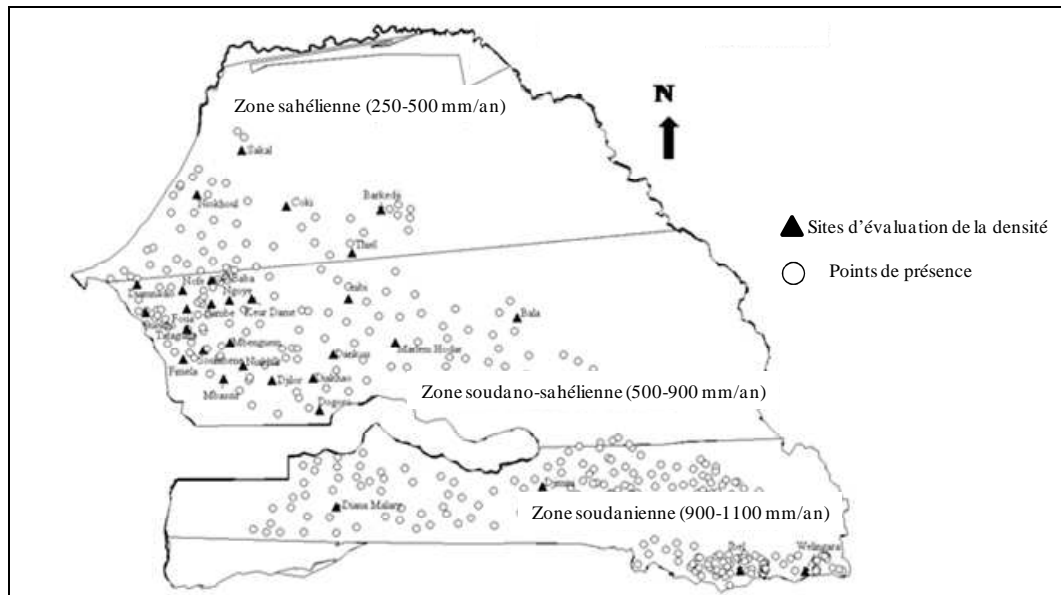


Figure 3.1 : Carte des points de présence du tamarinier au Sénégal (source : CNRF et Ministère de l'Environnement et des Forêts)

Dans ces 3 zones, une enquête semi-structurée a été menée auprès des responsables du MINEP (Ministère de l'Environnement et des Forêts) et des projets de gestion et de conservation des ressources naturelles, afin d'identifier les sites de peuplement de tamarinier. Le travail a consisté en une visite de tous les sites identifiés, suivie du relevé des données géographiques (coordonnées GPS, marque GARMIN). Des données de présence (nécessaires dans l'utilisation du modèle MAXENT) additionnelles ont été obtenues auprès de gestionnaires

des parcs forestiers et aires protégées, de centres de recherche en foresterie (Centre National de Recherche Forestière, Institut Fondamental d'Afrique Noire) et du projet de développement Wulaa Nafa.

Trente sites (villages) dans lesquels le tamarinier avait été identifié sur la base des données recueillies plus haut, ont été échantillonnés pour l'évaluation de la densité dans le peuplement. Le choix des 30 sites a été fait au hasard sur l'ensemble des sites visités (489) dans les 3 zones agro-écologiques (Figure 3.1) en tenant compte toutefois de leur accessibilité. Le nombre d'arbres au km² a été estimé en utilisant la méthode du transect (Figure 3.2) (voir Assogbadjo *et al.*, 2005).

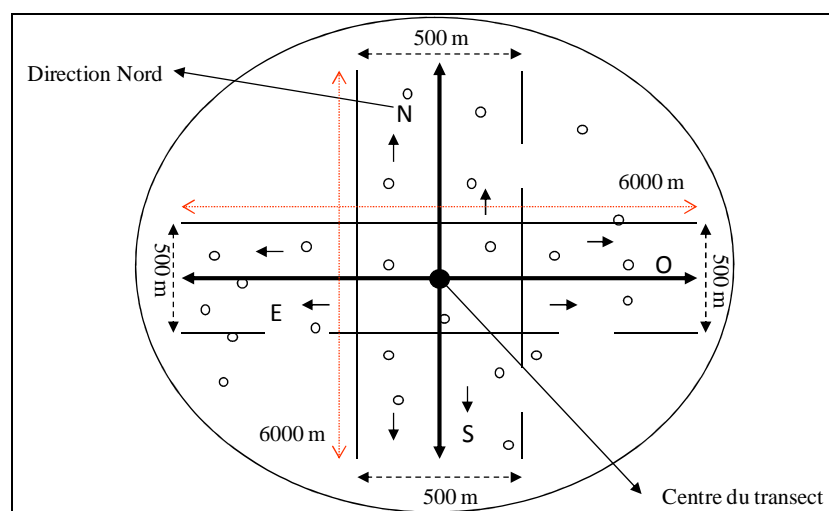


Figure 3.2 : Description schématique de la méthode des transects (Assogbadjo *et al.*, 2005)

Le centre d'un village donné a été choisi comme point de départ de chaque transect. Des transects allant du nord au sud et de l'est à l'ouest, sur une longueur de 6 km et sur 0,5 km de large, ont été réalisés. Les observations ont été réalisées par 4 personnes à 125 m d'intervalle d'une personne à l'autre. Ainsi le nombre de tamarinier a été compté le long du transect et ce nombre a été ramené en densité (au km²) sur la base de la surface couverte par le transect.

3.2.2 Données climatiques

Pour l'ensemble des sites, dix-neuf variables climatiques ont été répertoriées à partir de la base de données Worldclim (<http://www.worldclim.org/bioclimate>) à une résolution de 2,5 x 2,5 minutes (Hijmans *et al.*, 2005). Ces données ont été calées à la carte numérisée du Sénégal (Adm0) obtenue via la base de données DIVA-GIS (<http://www.diva-gis.org>) (GDAM, 2009).

Ces 19 variables (BIO1=Température moyenne annuelle, BIO2=Amplitude moyenne mensuelle de la température, BIO3=Isothermalité (variation saisonnière BIO2/BIO7* (100)), BIO4=Température moyenne saisonnière, BIO5=Température maximale du mois le plus chaud, BIO6=Température minimale du mois le plus froid, BIO7=Température annuelle trimestrielle, BIO8=Température moyenne du quartile le plus arrosé, BIO9=Température moyenne du quartile le plus sec, BIO10=Température moyenne du quartile le plus chaud, BIO11=Température moyenne du quartile le plus froid, BIO12=Précipitation annuelle, BIO13=Précipitation du mois le plus arrosé, BIO14=Précipitation du mois le plus sec, BIO15=Précipitation saisonnière, BIO16=Précipitation du quartile le plus arrosé, BIO17=Précipitation du quartile le plus sec, BIO18=Précipitation du quartile le plus chaud, BIO19=Précipitation du quartile le plus froid) sont considérées (Hijmans *et al.*, 2005) comme ayant une influence sur la répartition écologique des espèces végétales. Elles résument ainsi les conditions climatiques moyennes annuelles et saisonnières par leurs valeurs extrêmes et les variations intra-années (Busby, 1991 ; Yost *et al.*, 2008).

L'ensemble des caractéristiques climatiques à venir (prédiction future) utilisé pour les scénarios d'émissions (SRES : A2 et B2) (Tableau 3.1), a été obtenu via les modèles climatiques CCCMA-CGCM2 (*Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis*), CSIRO-MK2 (*Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation*), NIES99 (*National Institute for environmental studies of Japan*) et UKMO-HADCM3 (*Hadley Centre for Climate prediction and Research, Met Office, United Kingdom*) (Tableau 3.2) et pour les années 2020, 2050 et 2080 (Ramirez et Jarvis, 2010) ; mais préalablement calé à la carte du Sénégal.

Tableau 3.1 : Caractéristiques des deux scénarios de développement de la population à l’horizon 2100 (Beaumont *et al.*, 2008)

Scénario	Population Milliards (2100)	Croissance économique	Niveau primaire d’utilisation de l’énergie	Niveau d’utilisation des hydrocarbures	Niveau d’utilisation des terres
A2	15	Moyen	Élevé	Pétrole : faible à moyen	Moyen
				Gaz : trop élevé	
				Charbon : moyen à élevé	
B2	10	Moyen	Moyen	Pétrole : faible à moyen	Moyen
				Gaz : faible à moyen	
				Charbon : faible à élevé	

Le scénario A2 décrit un monde avec une croissance économique moyenne (Boko *et al.*, 2007 ; Nakicenovic *et al.*, 2009) ayant une population plus importante (15 milliards). Le scénario B2 du climat décrit un monde futur dont la croissance économique met l’accent sur des solutions de développement endogène et durable. Nous avons supposé pour ces 2 différents scénarios que chacun d’eux est susceptible de se produire autant que l’autre (Boko *et al.*, 2007).

Tableau 3.2 : Description des modèles climatiques utilisés

Modèle	Description du modèle	Références
CCMA-CGCM2	Modèle climatique global	Flato et Boer, 2001
CSIRO-MK2	<i>atmospheric mark climatic model</i>	Hirst <i>et al.</i> , 1996 et 1999
NIES99	Modèle climatique global	Emori <i>et al.</i> , 1999
UKMO-HADCM3	Modèle climatique global	Gordon <i>et al.</i> , 2000 ; Pope <i>et al.</i> , 2000

3.2.3 Modélisation de la distribution

Les données de présence du tamarinier recueillies sur le terrain et les données climatiques actuelles obtenues ci-dessus ont été utilisées pour modéliser la distribution potentielle actuelle du tamarinier à l’aide du programme MAXENT 3.3.2 (Phillips *et al.*, 2006). Les points de présence ont été comparés à un échantillon aléatoire de pixels d’arrière-plan (Phillips *et al.*, 2006 ; Phillips et Dudik, 2008). MAXENT attribue à un

endroit géo-référencé, une présence (sous forme de probabilité) qui est fonction des données climatiques actuelles. Ces probabilités de présence actuelle ou future sont alors représentées sous forme de cartes de distribution actuelle ou future des espèces. Divers scénarios climatiques de prédiction future ont été utilisés pour tenir compte de l'incertitude dans les prévisions climatiques à venir. Les paramètres par défaut du programme MAXENT ont été sélectionnés comme suggérés par les auteurs (Phillips et Dudik, 2008) pendant l'étape de simulation de la prédiction de la distribution de l'espèce.

3.2.4 La validation du modèle MAXENT

La performance du modèle a été déterminée en attribuant un sous-ensemble de données de présence pour calibrer le modèle, tandis que le reste des données a servi pour la validation du modèle. Quatre-vingts pour cent des données a été utilisé pour calibrer le modèle, et vingt pour cent pour le valider comme suggéré par Phillips et Dudik (2008). Un modèle ayant une bonne puissance de prédiction doit pouvoir prédire tous les sites de présences de l'espèce utilisée en entrée (Phillips *et al.*, 2006 ; Buermann *et al.*, 2008 ; Nakicenovic *et al.*, 2009).

Le modèle MAXENT a généré des valeurs de probabilité de présence. Un seuil doit être choisi pour définir la zone de présence/absence ou propice/non propice. La zone en-dessous de la courbe de réponse (ROC) sert de mesure de seuil indépendante de la puissance du modèle en termes de sensibilité et de spécificité (Phillips *et al.*, 2006). La sensibilité d'un certain seuil est définie comme étant la fraction de toutes les données de présence prédite correctement (la probabilité d'une présence vraie) (Boko *et al.*, 2007 ; Phillips et Dudik, 2008 ; Yost *et al.*, 2008).

Quand on obtient une probabilité de présence faible, une valeur seuil est choisie pour définir la présence. Cette dernière va accroître la sensibilité et par conséquent décroître la spécificité (Phillips et Dudik, 2008). Quand la probabilité de présence est élevée, la valeur seuil est choisie à l'inverse. La courbe de réponse du modèle (ROC) est fonction du pourcentage de sensibilité (présence vraie) et de la spécificité (absence vraie) tracée sur différents points de rencontre (1-spécificité) (Bowe, 2007 ; Buermann *et al.*, 2008).

Chaque point de la courbe représente une paire sensibilité/spécificité correspondant à un seuil de décision en particulier. MAXENT utilise uniquement des données de présence : la fraction de la zone prédite (la fraction totale de la zone propice) est utilisée à la place de la fraction standard de l'absence prédite présente (absence

fausse) (Phillips *et al.*, 2006). Un test parfait a une courbe de réponse à 100% de sensibilité et un pourcentage équivalent de spécificité. Par conséquent, plus la courbe de réponse a 100% de sensibilité, plus le test est satisfaisant (Osborne et Leitao, 2009). La valeur d'AUC (*Area Under Curve*) se situe généralement entre 0,5 et 1,0. Une valeur de 0,5 montre que le modèle n'est pas performant. Des valeurs proches de 1 indiquent un modèle performant (Phillips *et al.*, 2006).

3.2.5 *Le seuil*

Toutes les valeurs de probabilité d'occurrence ont été reclassées sur la carte en utilisant la clé suivante : zone propice = 1 ; zone non propice = 0 ; pour pouvoir prédire les zones favorables ou non favorables à l'espèce *T. indica* (Liu *et al.*, 2005). Pour tenir compte de la variation dans les prévisions en raison de l'incertitude dans les modèles climatiques (Beaumont *et al.*, 2008), des seuils (20 et 80%) ont été combinés pour identifier les zones propices du tamarinier par le modèle MAXENT suivant un, deux ou trois scénarios climatiques. La carte obtenue a été superposée à la carte de la zone propice actuelle pour identifier les changements entre la zone prédite actuelle et la zone favorable dans le futur.

3.2.6 *Explication de la distribution par les variables environnementales*

Un certain nombre de méthodes a été utilisé pour identifier la contribution des différentes variables environnementales à la distribution du tamarinier au Sénégal. La méthode du pourcentage de contribution (Osborne et Leitao, 2009) a été utilisée lors du test du modèle MAXENT. Le test a été exécuté à travers le programme MAXENT sous le nom de *gain* (Osborne et Leitao, 2009). Chaque étape de l'algorithme de MAXENT augmente le gain de performance du modèle. Le programme attribue l'augmentation du gain à la variable environnement dont il dépend. Ces contributions des variables sont ensuite converties en pourcentages et utilisées comme une mesure de leur contribution au processus de prédiction (Phillips *et al.*, 2006). Ces valeurs de contribution en pourcentage dépendent d'un langage de programmation utilisé par MAXENT pour une solution optimale.

L'autre méthode utilisée est celle du "*jackknife test*" dans laquelle un certain nombre de modèles sont créés sur base du même principe que MAXENT. A chaque étape de la procédure, une variable est exclue et un modèle est créé avec les variables restantes (Phillips *et al.*, 2006 ; Buermann *et al.*, 2008). De manière opposée, un modèle est aussi créé avec la variable exclue. Pour chaque modèle, le gain obtenu avec les données de validation et de calibration du modèle est enregistré sous forme d'une valeur appelée AUC. Pour

des variables environnementales importantes (valeur de contribution à l'explication de la distribution supérieure à 30%) du modèle, elles montrent un gain élevé (valeur croissante de AUC) quand elles sont prises individuellement, et à l'inverse quand elles sont exclues du modèle. En raison de la nature des valeurs en pourcentage de contribution et la forte corrélation entre les variables environnementales, seulement celles qui présentent une contribution significative (30 à 60%) ont été choisies (Osborne et Leitao, 2009 ; Phillips *et al.*, 2006).

3.2.7 Les courbes de réponse des variables

Les courbes de réponse des variables environnementales ont été créées par le programme MAXENT. Elles montrent comment la prédiction repose sur les variables explicatives, ce qui décrit les exigences écologiques de l'espèce (la niche écologique) (Buermann *et al.*, 2008, Yost *et al.*, 2008).

3.2.8 L'analyse statistique des données de densité de peuplement

Une analyse de la variance des moyennes a été effectuée pour faire ressortir les différences significatives entre les densités des peuplements des différentes zones agro-écologiques. La corrélation de Spearman a servi pour étayer l'hypothèse selon laquelle les densités des peuplements du tamarinier seraient liées à la distance aux villages.

3.3 Résultats

3.3.1 Carte de la distribution actuelle

Le tamarinier se rencontre dans le centre, le sud (zone humide) et dans les zones côtières du Sénégal. Cependant, nous n'avons pas reçu d'information sur l'espèce dans le nord et le nord-est du pays (Figure 3.1).

3.3.2 L'analyse des densités des peuplements de tamarinier au Sénégal

Une différence significative ($P < 0,05$) a été observée pour la densité de peuplement entre les zones agro-écologiques. La densité a tendance à décroître de la zone soudanienne vers la sahélienne (du sud du pays vers le nord) (Figure 3.3).

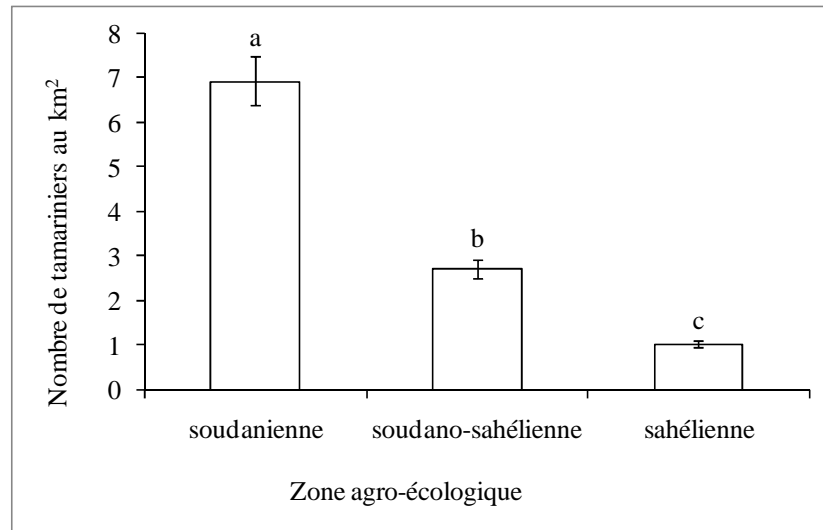


Figure 3.3 : Variation de la densité des tamariniers dans les différentes zones agro-écologiques du Sénégal (sur 30 sites).

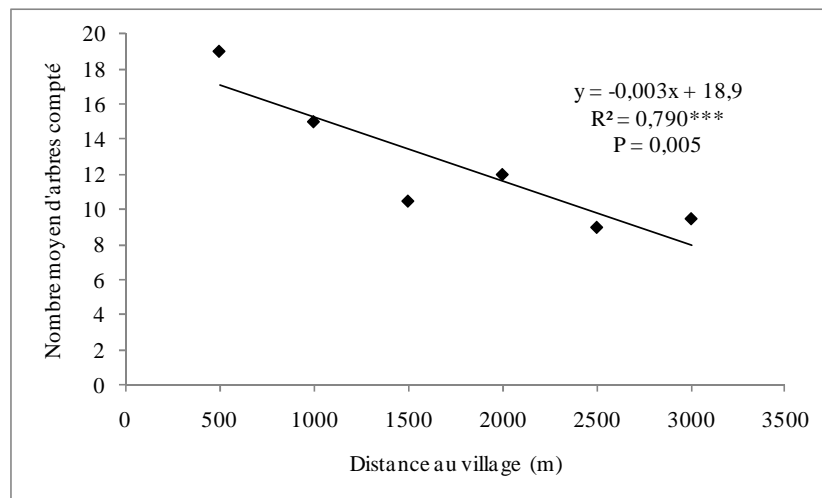


Figure 3.4 : Relation (corrélation de Spearman) entre le nombre moyen de tamariniers et la distance avec le village le plus proche (30 villages échantillonnés) au Sénégal.

La corrélation de Spearman ($R^2 = 0,790$; $P < 0,05$) révèle que sur la totalité des données le nombre de tamariniers par km^2 diminue avec la distance au village le plus proche (Figure 3.4). Une relation similaire a été obtenue entre la densité et la distance au village pour la zone agro-écologique soudanienne ($R^2 = 0,92$; $P < 0,05$) et soudano-sahélienne ($R^2 = 0,94$, $P < 0,05$). D'autre part, cette corrélation entre le nombre d'arbres et la distance au village n'est pas significative pour la zone sahélienne. Ceci serait probablement l'effet des faibles densités de peuplement observées dans la zone.

3.3.3 Modèle de distribution de l'espèce

La contribution des facteurs environnementaux dans la prédiction de la distribution du tamarinier

Les variables identifiées comme les plus importantes pour expliquer la distribution de tamarinier sont la variation saisonnière de la température de l'air (BIO3), la température maximale du mois le plus chaud (BIO5), la précipitation du mois le plus arrosé (BIO13), et la précipitation saisonnière (BIO15). Le tamarinier apparaît très influencé (négativement) par la variation saisonnière de la température de l'air (Figure 3.5a).

La probabilité d'occurrence du tamarinier est également perçue baisser dans des zones à haute température maximale ($> 39^\circ\text{C}$), le niveau optimal se situant à 30°C . On observe une baisse importante de la probabilité d'occurrence du tamarinier à partir de 40°C (Figure 3.5b). De fortes précipitations en intensité ou dans le temps (étalement des fortes pluies dans le temps) au courant de la partie de l'année la plus humide semblent aussi réduire l'aptitude du développement du tamarinier (Figures 3.5c et 3.5d).

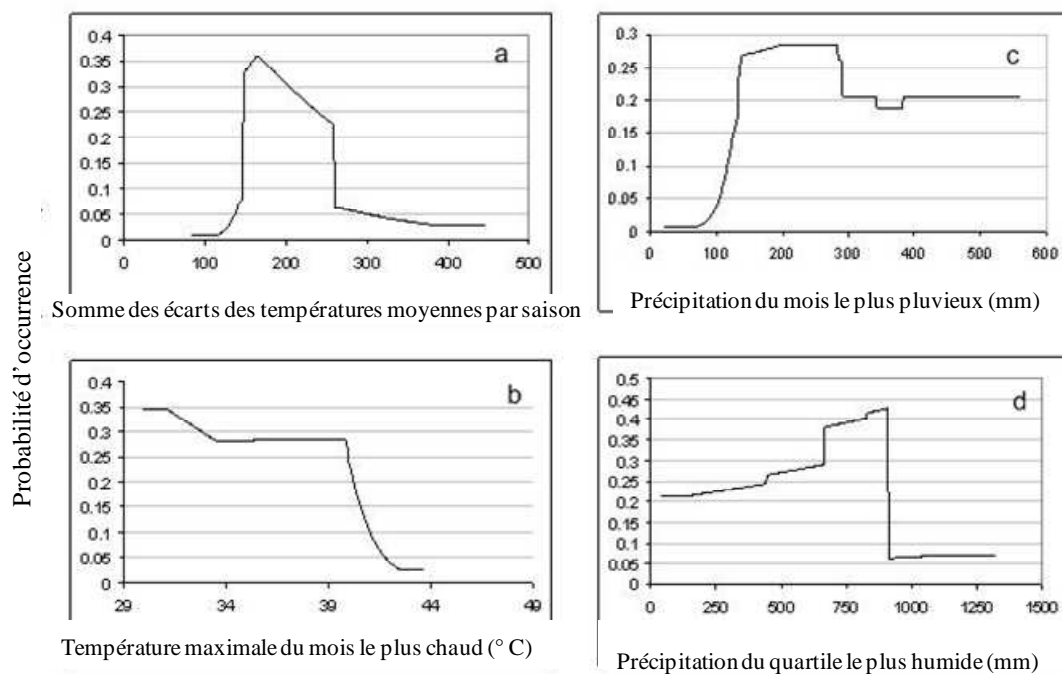


Figure 3.5 : Courbes d'explication des variables climatiques de la prédiction de la distribution du tamarinier au Sénégal, générées par le modèle MAXENT

La probabilité d'occurrence du tamarinier au Sénégal augmente (0,45) avec la pluviométrie annuelle jusqu'à 900 mm au-delà de laquelle cette probabilité d'occurrence est considérablement réduite (0,06).

La distribution actuelle

La distribution sous les circonstances climatiques actuelles montre que seules trois régions (Thiès, Fatick et Kaolack) du bassin arachidier (au centre) et la région de Kédougou (sud-est) semblent être propices pour la croissance et le développement du tamarinier (Figure 3.6a). Lorsque cette distribution est pondérée par le seuil du modèle MAXENT (Figure 3.6b), nous constatons que les zones propices restantes sont le bassin arachidier et la région du sud (Kédougou et Kolda). Le tamarinier n'a pas été observé à Tambacounda (Figure 3.1). Le modèle confirme la zone de Tambacounda comme étant non propice au développement du

tamarinier. Cette situation s'expliquerait par les températures journalières élevées (40°C) observées dans cette région.

La distribution à venir du peuplement de tamarinier au Sénégal

Les scénarios climatiques des prédictions utilisés ont montré des changements importants entre la distribution actuelle et celle à venir (Figure 3.6c). Les prévisions de la distribution en 2020 indiquent que la zone située dans le sud-est du Sénégal qui avait été prédite être propice dans les conditions actuelles est prédite être non propice par les 4 modèles/scénarios climatiques utilisés (Figure 3.6c).

Toutefois, la zone du centre (la région du bassin arachidier) serait l'exception et resterait toujours propice au développement du tamarinier. La région nord est prédite (et reste) par 4 scénarios climatiques non appropriée pour le développement du tamarinier. Il faut toutefois noter que le modèle prédit une augmentation de la zone favorable pour le tamarinier via une extension vers la région sud (Kolda). Aucune différence n'a été observée entre les valeurs prédites par les scénarios A2a et B2a. Les cartes des zones de distribution du tamarinier en 2050 montrent une importante réduction de la zone favorable au développement du tamarinier. Des zones de très faibles superficies, ont été prédites devenir propices au développement du tamarinier. Dans le scénario A2a, une petite zone dans le sud et dans la région du centre (bassin arachidier) continue d'être propice au tamarinier. Le scénario B2a confirme d'ailleurs les résultats du scénario A2a.

En 2080, les scénarios A2a et B2a montrent une réduction importante de la zone optimale et potentielle au développement du tamarinier au Sénégal. Le scénario A2a prédit une disparition quasi-totale de la zone potentielle au développement du tamarinier en 2080. Pour le Sénégal entier, une toute petite région du nord-est pourrait rester propice pour le tamarinier (résultat d'un seul scénario climatique). Le scénario B2a annonce une toute petite partie du bassin arachidier (région de Fatick) qui resterait encore propice au développement du tamarinier.

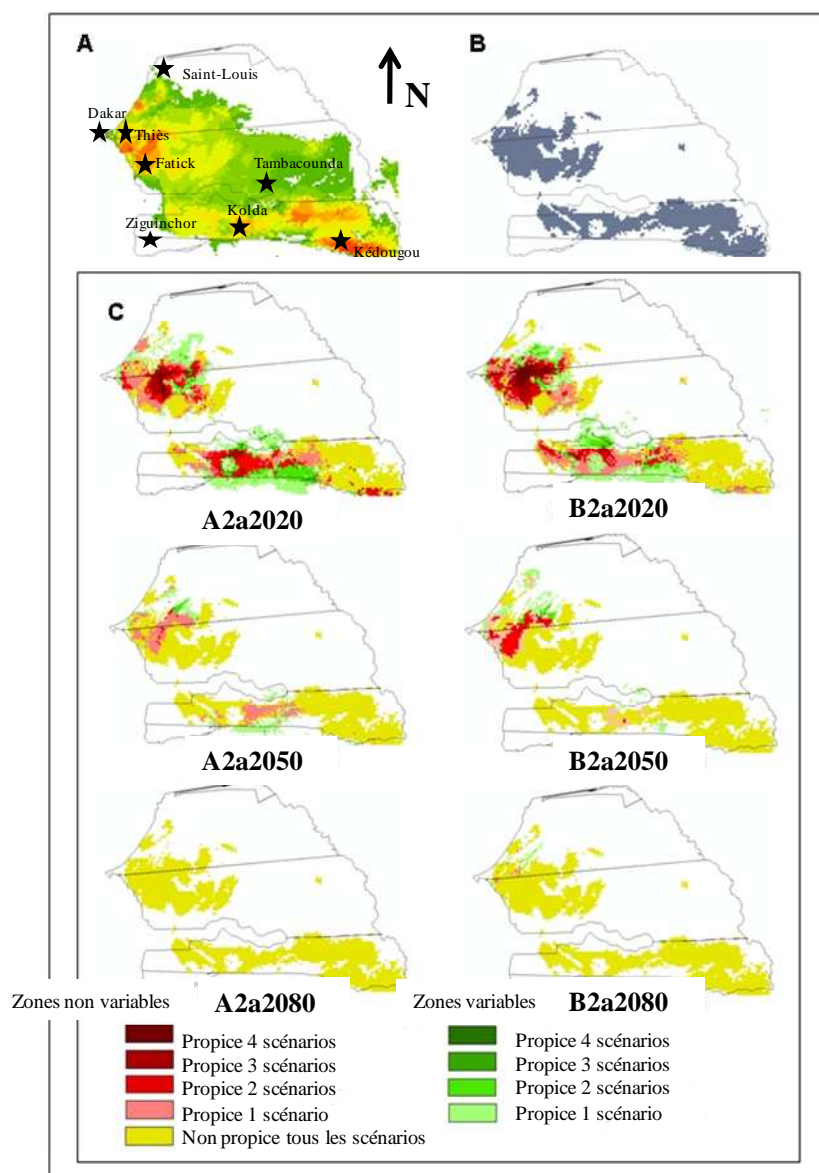


Figure 3.6 : A) Index d'aptitude de la zone de distribution actuelle de tamarinier au Sénégal (la couleur rouge représente une forte probabilité d'aptitude); B) état actuel des zones propices au développement tamarinier; C) capacité d'aptitude actuelle et future indiquant les variations des zones propices au développement du tamarinier en fonction des scénarios climatiques.

La validation du modèle

Le modèle de prédiction de la distribution du tamarinier utilisé a montré un niveau de performance acceptable avec des valeurs d'AUC au calibrage de 0,83 après le test du modèle MAXENT. Cela dénote que la plupart des points de présence du tamarinier ont été prédites de manière satisfaisante au vue du seuil de probabilité (0,83) de AUC après le test du modèle MAXENT (Osborne et Leitao, 2009).

3.4 Discussion

Les données de la densité ont montré une relation entre la densité de peuplement de tamarinier et leur distance par rapport aux unités habitées. Assogbadjo (2006) indiquait qu'un certain nombre de ces arbres fruitiers comme le baobab et le tamarinier auraient été introduits par l'homme. D'autres auteurs (Diallo *et al.*, 2007 ; Diallo, 2001 ; Boffa, 1995) indiquent que ces espèces se seraient établies de manière naturelle et bénéficient de la gestion de la population riveraine du fait de leur importance. Depuis longtemps, le tamarinier fait partie des systèmes de culture de la zone sahéenne ouest-africaine, les populations n'accordent que très peu d'importance à sa plantation (Buchmann *et al.*, 2009 ; Havinga *et al.*, 2010). Les paysans de cette zone de l'Afrique ont tendance à planter des arbres exotiques comme *Mangifera indica* ou *Azadirachta indica*, mais peu souvent des espèces endogènes (De Caluwé *et al.*, 2010), même s'ils reconnaissent que ces espèces sont à multiples usages.

Dans une étude récente, seulement 10% des 220 personnes enquêtées dans la région de l'Afrique de l'Ouest (Sénégal, Mali et Bénin) où le tamarinier fait partie du système agraire, ont déclaré avoir jamais planté un tamarinier (Buchmann *et al.*, 2010). En effet, seulement quelques plantations isolées de tamarinier ont été notées au Sahel (Le Houerou 1979 ; Buchmann *et al.*, 2010). Il semblerait donc peu probable qu'un nombre d'arbres plus grand que dans la végétation lointaine puisse se rencontrer à proximité des villages du fait de leur plantation.

Les différences observées au niveau des densités des peuplements et les nombres d'arbres observés sont plus élevées autour des villages (dans les champs) que dans la végétation de savane naturelle, ceci illustre l'impact de l'homme via la sélection sur la formation des systèmes agro-forestiers (Boffa, 1995 ; Schreckenber, 1996). Les terres agricoles sont souvent disposées en cercles concentriques autour des exploitations (en Afrique de l'Ouest), caractérisées par différentes cultures et techniques culturales, et modes d'utilisation des

sols (Boffa, 1999). La gestion des tamariniers est souvent effectuée sur ces parcelles cultivées à proximité des villages. Par exemple, chez les peuples Bwaba-Bobo-Oulé au Burkina Faso, les parcelles situées entre 25 et 50 m des cases sont fortement amendées en matière organique et contiennent des pieds de baobab et de tamarinier (Boffa, 1995). En outre, la nature des espèces que l'on y rencontre varie, avec une domination de certaines espèces à usage multiples (Boffa, 1999).

Des études récentes effectuées en Afrique de l'Est ont montré l'abondance du tamarinier autour des villages et que les sujets à diamètres élevés (2,5 à 3 m) sont également observés à proximité des habitations (Nyandoi, 2005). Ceci supposerait que ces tamariniers auraient bénéficiés de conditions plus favorables et/ou une gestion/protection spécifique pour leur développement que ceux de la forêt naturelle. Toutefois, nos résultats ne nous permettent pas d'avoir des informations sur le mode de gestion du tamarinier en forêt ni ailleurs. Une étude similaire au Bénin, qui a été complétée par de visites de terrain et interviews a fait ressortir que la densité du tamarinier dans les forêts galeries était de 3 fois que dans les savanes boisées et de 8 fois plus élevée que sur les champs agricoles (Fandohan *et al.*, 2010). On ne pourra donc tirer une conclusion sur la dynamique de ces populations à partir d'une étude effectuée à un rayon de 3 km des villages.

La carte de la distribution actuelle du tamarinier au Sénégal a montré que l'espèce est largement distribuée dans tout le pays, mais ne se retrouve que sous forme relique dans la zone nord (Figure 3.1). Ceci pourrait s'expliquer par les températures très élevées (moyenne > 40°C) et le faible niveau de précipitation observé dans cette région (Ndiaye *et al.*, 2002 ; Bowe, 2007 ; Fandohan *et al.*, 2010 ; Bowe et Haq, 2010). Nous avons constaté que, lorsque le tamarinier est observé dans la zone sahélienne (par exemple à Gnibi au Sénégal), où la pluviométrie annuelle est inférieure à 250 mm, les arbres sont généralement situés le long d'un cours d'eau saisonnier (dont l'eau tari en saison sèche). Ceci témoigne en outre de l'importance de la température et de l'eau dans le développement du tamarinier.

La température moyenne maximale de l'air et la variation saisonnière de la température ont été identifiées comme les variables environnementales explicatives de la distribution de tamarinier. Une pluviométrie élevée (900 mm/an), en particulier sur une longue période de temps a également été observée réduire l'aptitude d'une zone pour le développement du tamarinier (Bowe, 2007 ; Bowe et Haq, 2010 ; Diallo *et al.*, 2007). Ces paramètres climatiques (températures et pluviométrie) pourraient être les principaux facteurs limitant l'expansion du tamarinier dans sa distribution en zone guinéenne. Bowe et Haq (2010) ont constaté qu'en Afrique de l'Ouest, le tamarinier éprouvait des conditions plus sèches que dans la partie orientale de

l'Afrique ; ceci expliquerait une meilleure adaptation du tamarinier à la zone sahéenne de l'Afrique de l'Ouest.

Les prévisions climatiques sur les périodes à venir indiquent que la taille des surfaces des zones propices au développement du tamarinier diminuerait de manière significative au-delà de 2020. Les températures en Afrique de l'Ouest sont estimées à augmenter de 2 à 6° C d'ici 2100 (Christensen *et al.*, 2007 ; Boko *et al.*, 2007). Les modèles de prédiction de la pluviométrie à venir ont révélé des résultats mitigés (Christensen *et al.*, 2007 ; Meehl *et al.*, 2007). Les estimations varient entre une diminution d'environ 20% et une augmentation d'environ 20% d'ici 2100 (Christensen *et al.*, 2007 ; Meehl *et al.*, 2007). Toutefois, une estimation à la hausse de la pluviométrie peut être observée pour les régions très humides (Christensen *et al.*, 2007).

Les résultats obtenus sur les paramètres du climat (température et pluviométrie) dans notre étude corroborent ceux obtenus par Christensen *et al.* (2007) sur les effets du changement climatique (élévation des températures et baisse de la pluviométrie) dans la zone sahéenne. La plupart des zones qui ont changé leur statut initial de zone favorable à une zone inappropriée en 2020 pour le tamarinier l'auraient fait à cause de l'augmentation sans cesse de la température. La zone à proximité du bassin arachidier située vers l'intérieur du pays, est prédite se réchauffer (jusqu'à 40°C pour atteindre 42°C) à l'avenir, ce qui pourrait ainsi réduire progressivement la surface de distribution du tamarinier.

Dans le sud du pays, une vaste zone à l'est actuellement (2010) prédite comme appropriée par les modèles/scénarios utilisés deviendrait, progressivement non propice au tamarinier du fait de la hausse des températures. L'augmentation des précipitations, particulièrement pendant les périodes les plus pluvieuses (août/septembre), pourrait expliquer la réduction de la zone de distribution du tamarinier dans cette région. Une augmentation de la zone appropriée dans le centre-ouest du pays (Thiès, Fatick et Kaolack) serait probablement due à une augmentation des précipitations attendue de 400 mm/an à 600 mm/an.

La réduction dramatique de la zone de distribution du tamarinier au Sénégal à l'horizon 2050 s'expliquerait principalement par l'augmentation projetée/modelée de la température. Seulement la région du centre, du fait des températures présentement modérées (en-dessous de 40°C) et dont on ne prévoit une augmentation et l'augmentation prétendue de la pluviométrie actuelle (à 400 mm/an) serait toujours appropriée au développement du tamarinier.

Basées sur des futures prévisions du climat (2050), il s'avérerait que les régions du centre, du sud du pays et en particulier du bassin d'arachidier (régions de Thiès, Fatick et Kaolack) pourraient devenir des zones de refuge importantes des peuplements de tamarinier au Sénégal, en raison de leurs températures comparativement basses (la moyenne annuelle inférieure à 39°C).

L'évaluation des densités actuelles a révélé que la densité dans la zone sahélienne et soudano-sahélienne est sensiblement inférieure à celle de la zone soudanienne. À de telles faibles densités (1 à 3 arbres au km²), les espèces peuvent souffrir de problèmes liés à une baisse de la diversité génétique intra-population (exacerbée par le fait que le tamarinier est allogame) (Diallo *et al.*, 2008 ; Dawson *et al.*, 2009). Ceci pourrait influencer la capacité d'adaptation de l'espèce face aux changements climatiques. La conservation de l'espèce *in situ* dans cette région pourrait être un travail important pour la pérennisation de l'espèce au Sénégal.

En 2080, peu ou pas de zones propices au tamarinier persisteront au Sénégal. Bowe et Haq (2010) ont relevé une différence dans l'exigence écologique du tamarinier entre l'Est et l'Ouest de l'Afrique et en déduisent une éventuelle différence génétique des caractères adaptatifs à l'échelle régionale plutôt que à l'échelle du pays. Les mêmes auteurs ont défini la température maximale du mois le plus chaud au niveau de sa distribution mondiale à 41°C. Les températures maximales prévues au Sénégal en 2050 et 2080 sont estimées au-delà de ce seuil maximal, ce qui explique que l'espèce ne serait pas capable de survivre dans de telles conditions.

3.5 Conclusion

Il est important de noter que la variation entre les scénarios/modèles de distribution de l'espèce pourrait s'expliquer par des erreurs et incertitudes dues aux modèles climatiques. Le rapport du GIEC (Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat) a noté que les modèles de changement climatique montrent une certaine incohérence dans les projections des précipitations pour l'Afrique. Selon les modèles/scénarios de prédiction des données climatiques utilisés dans cette étude, le Sahel serait plus ou moins humide à l'avenir (Meehl *et al.*, 2007). Pour cette raison, les résultats de notre étude doivent être interprétés en tenant compte de ces incertitudes/déviations possibles dans les modèles de prédiction. Dans la présente étude, nous avons tenté d'expliquer en partie cette variation en combinant le résultat d'un certain nombre de scénarios et de modèles pour prévoir l'adéquation future du tamarinier au Sénégal. En comparant ce résultat à des mesures de densité actuelle nous avons posé une problématique sur le mode de conservation

à prévoir pour l'espèce et identifier les zones potentiellement appropriées pour le maintien du tamarinier au Sénégal face aux effets du changement climatique.

Ainsi des actions pourront être entreprises par les décideurs sur les différents modes de gestion de cette espèce (*T. indica*) notamment *in situ* (les aires protégées, les forêts naturelles aménagées, les plantations à travers les activités de reboisement des espaces) mais aussi par la création des collections *ex-situ* etc. En outre une variabilité génétique entre population a été observée. Elle pourrait à l'avenir être exploitée pour le reboisement, en procédant à la plantation des sujets du même milieu dans des écosystèmes similaires à leur aire de provenance.

Chapitre 4

Potentiel mycorhizien des parcs à tamariniers (*Tamarindus indica* L.) dans trois zones agro-écologiques du Sénégal.

Adapté à partir de : Bourou, S., Ndiaye, F., Diouf, M., Diop, T., & Van Damme, P. (2010). Tamarind (*Tamarindus indica* L.) parkland mycorrhizal potential within three agro-ecological zones of Senegal. *Fruits*, 65 (6) p. 1-9.

4.1 Introduction

Dans les écosystèmes tropicaux, les espèces fruitières sauvages jouent de multiples rôles dans la conservation de la biodiversité et l'amélioration de la situation alimentaire des populations rurales. De plus, elles génèrent des revenus par la vente et la commercialisation de leurs fruits et feuilles (Termote *et al.*, 2010a ; Termote *et al.*, 2010b). Parmi ces espèces, on peut citer *Ziziphus mauritiana*, *Balanites aegyptica*, *Tamarindus indica*, *Adansonia digitata* ou *Ximenia americana*. En outre, les arbres fruitiers sauvages sont utilisés en médecine traditionnelle et comme source de bois de chauffe et de service (Ribot, 1999).

Le tamarinier (*T. indica*), en particulier, est une espèce fruitière de subsistance, qui est largement utilisée dans l'alimentation humaine sous différentes formes. Cette espèce fruitière a une large répartition géographique dans les régions sub-tropicales (Diallo, 2001 ; El-Siddig *et al.*, 2006 ; Bowe, 2007 ; Bowe et Haq, 2010). *T. indica* appartient à la famille des Fabaceae et est une espèce à usages multiples ; chaque partie de l'arbre peut générer une valeur ajoutée (voir chapitre 1). Toutefois, *T. indica* est l'une des espèces affectées par la dégradation des écosystèmes (Ba *et al.*, 2001). Dans la zone du Sahel, les tamariniers sont caractérisés par une croissance végétative lente (El-Siddig *et al.*, 2006 ; Diallo *et al.*, 2008).

L'association symbiotique des champignons mycorhiziens arbusculaires (MVA) avec diverses espèces de plantes dans divers milieux naturels sont d'une grande importance dans l'écologie et le développement des espèces végétales. Cette symbiose améliore la croissance végétative des plants et pourrait ainsi être utilisée dans des programmes de reboisement axés sur les espèces végétales à croissance lente (Wubet *et al.*, 2004).

Le coût croissant de l'application d'intrants (organiques) dans la production agricole souligne l'importance de l'étude de la gestion des organismes microbiens et de leurs interactions dans l'interface sol-plante. Les associations mycorhiziennes se sont révélées être stimulatrices de la croissance des plantes (elles améliorent leur nutrition hydrominérale) pour la plupart des espèces d'arbres tropicaux qui y sont associées (Ba *et al.*, 2001 ; El-Siddig *et al.*, 2006 ; Ashwani *et al.*, 2010 ; Shamshiri *et al.*, 2011).

Une étape cruciale dans l'application avec succès de champignons mycorhiziens arbusculaires, est la sélection d'isolats fongiques efficaces et aptes à s'associer, ainsi que leur production industrielle. A cet effet, il serait recommandable d'identifier et de tester les écotypes des mycorhizes endogènes ainsi que ceux

considérés comme connus des collections et dont l'efficacité pour les cultures cibles est établie (Calvente *et al.*, 2004). Par conséquent, il apparaît important de caractériser la diversité naturelle des champignons mycorhiziens dans le sol et sur les racines des peuplements de tamarinier. A ce jour, très peu de données existent sur la diversité mycorhizienne associée aux arbres fruitiers tropicaux (El-Siddig *et al.*, 2006).

Des travaux antérieurs ont, toutefois, souligné l'importance de la symbiose mycorhizienne pour le développement végétatif du tamarinier (Ba *et al.*, 2001). Les objectifs du présent travail consistent à (1) caractériser la diversité des champignons mycorhiziens associés à la rhizosphère de tamarinier *in situ* au Sénégal au niveau des trois zones agro-écologiques ; et (2) évaluer le potentiel mycorhizien (fréquence de mycorhisation et le taux de colonisation racinaire) des parcs à tamarinier.

4.2 Méthodologie

Trois sites de peuplements de tamariniers (un peuplement étant défini comme un regroupement homogène de pieds de tamarinier ; alors que le site est défini ici comme étant l'endroit où l'on a observé des tamariniers sur une superficie de plus de 5 hectares) ont été retenus pour chacune des trois zones agro-écologiques, les zones sahélienne (i), soudano-sahélienne (ii) et soudanienne (iii) (Figure 4.2). Pour chaque site, dix arbres ont été choisis au hasard. Trois échantillons de sol (250-300 g) et des racines fines des arbres (diamètre inférieur à 1 mm) ont été prélevés pour chaque arbre à l'aide d'une tarière (Edelman, Φ 7cm, hauteur 123 cm) à 1, 3 et 5 m du tronc, respectivement, et à une profondeur comprise entre 0-40 cm.

Tous les échantillons provenant d'un site ont été mélangés en un échantillon composite et étiquetés (Diallo, 1998). Ces échantillons de sol ont été séchés à l'air libre au laboratoire et conservés dans des sachets plastiques pendant un mois à une température de 4°C. Pour chaque site, un échantillon (*échantillon N°1*) aliquote de 200 g a été utilisé pour une analyse physico-chimique notamment pour les paramètres tels que : le pH-H₂O, l'azote totale, le taux en matière organique, le phosphore assimilable et la texture (au laboratoire des sols de l'IRD à Dakar au Sénégal) tandis qu'une autre partie (*échantillon N°2*) a servi pour l'isolement des spores des champignons mycorhiziens arbusculaires (Ba *et al.*, 2001 ; Cayenne et Scott, 2011).

4.2.1 Colonisation des racines des arbres du peuplement

La méthode du *Gridline* (Giovanetti et Mosses, 1980 cité par Ducouso *et al.*, 2004 ; Castillo *et al.*, 2011) a été utilisée pour évaluer la mycorhisation des racines des peuplements de tamarinier par les champignons

mycorhiziens arbusculaires. Des racines fines ont été sélectionnées au hasard à partir de l'échantillon N°2 ramené du terrain et réparties dans des tubes à essai. Elles ont ensuite été colorées au bleu de trypan (0,05%) pour mettre en évidence les structures (filaments mycorhiziens) d'infection des champignons mycorhiziens arbusculaires (Ducouso *et al.*, 2004 ; Castillo *et al.*, 2011). Le niveau d'infection des racines a été déterminé en utilisant la méthode du *Gridline* (Mardukhi *et al.*, 2011) qui consiste en un décompte des points d'impact d'infection mycorhizien sur les racines. Des observations histologiques ont été réalisées au microscope (Stereo Microscope, 20x/40x top-and-transmitted-light) par l'examen des fragments de racines (0,5 cm) dans une boîte de Pétri à fond quadrillé (Figure 4.1).

L'examen des racines fines colorées a été fait en suivant les lignes horizontales et verticales du fond de quadrillage de la boîte de Pétri. Chaque point d'infection mycorhizienne qui croise une ligne verticale ou horizontale du fond de quadrillage de la boîte de pétri a été compté. Le nombre de points d'intersection de chaque racine mycorhisée a été divisé par le nombre total d'intersection racinaire (infectées ou pas) et avec les lignes (verticale et horizontale) du quadrillage de la boîte de Pétri. La fréquence de mycorhisation des racines observée a été obtenue par la formule suivante (Mardukhi *et al.*, 2011) :

$$F = [(NmH + NmMV) / (NiV + NiH)] \times 100 \quad (4.1);$$

où NmH et NmV sont les points d'intersection des racines mycorhisées avec les lignes horizontales et verticales du fond de la boîte de Pétri, respectivement, alors que le NiV et le NiH représentent le nombre total des intersections des racines avec les lignes verticales et horizontales, respectivement.

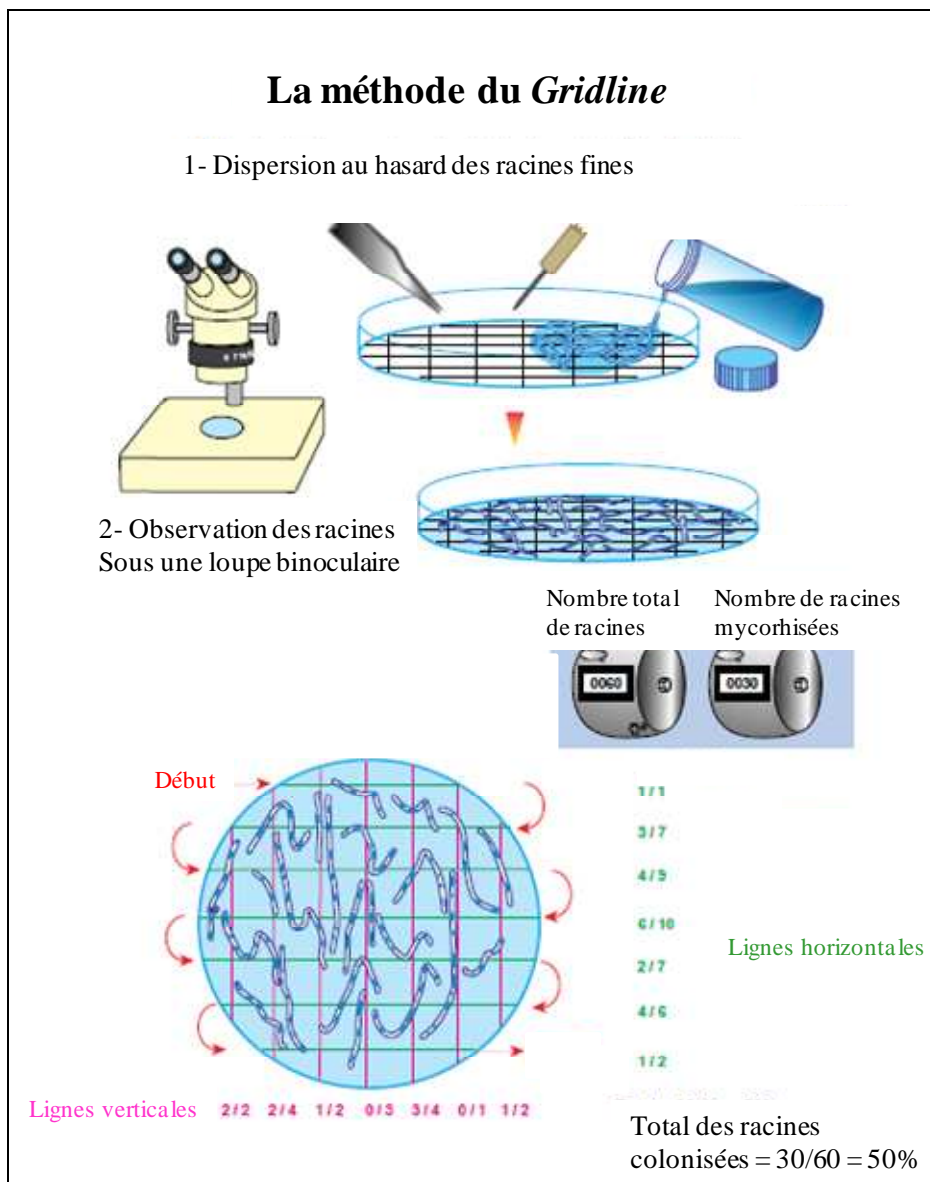


Figure 4.1 : Schéma descriptif de la méthode du *Gridline* (Mardukhi *et al.*, 2011)

4.2.2 Piégeage des propagules (spores viables) des champignons mycorhiziens

La densité des propagules et spores viables des champignons mycorhiziens a été évaluée en utilisant la méthode du *Most Probable Number* (MPN) (Mardukhi *et al.*, 2011). Pour éviter toute contamination mycorhizienne externe, le sable de plage a été prélevé, stérilisé (120° C pendant 2 h) et a été mélangé à des échantillons de sol de chaque site en des dilutions décroissantes.

Chaque niveau de dilution a été répété cinq fois dans des pots plastiques de volume 0,5l et stockés dans une chambre de culture du laboratoire du CERAAS au Sénégal. La dilution 10^{-1} a été composée de 30 g de sol non stérile + 270 g de sable stérilisé = 300 g (1). A partir de cet échantillon de base de 300 g, un échantillon aliquote de 250 g a été prélevé et réparti en cinq répétitions de 50 g par pot ; sur le reste des 50 g, 30 g a été prélevé et dilué à 10^{-2} via :

- dilution 10^{-2} : 30 g + 270 g de sol stérilisé = 300 g (2) ;
- dilution 10^{-3} : 30 g + 270 g de sol stérilisé = 300 g (3) ;
- dilution 10^{-4} : 30 g + 270 g de sol stérilisé = 300 g (4) ;
- dilution 10^{-5} : 30 g + 270 g de sol stérilisé = 300 g (5) ; et
- dilution 10^{-6} : 30 g + 270 g de sol stérilisé = 300 g (6).

Le maïs (*Zea mays* L.) a été utilisé comme plante piège au vue de son potentiel mycorhizogène (Calvente *et al.*, 2004) et de la facilité de l'obtention des graines. Les semences ont d'abord été désinfectées à l'eau de javel pendant 3 minutes, puis rincées et trempées dans de l'eau distillée pendant 30 minutes (Guissou, 2009 ; Ba *et al.*, 2001). Les graines ainsi désinfectées ont été conservées dans une chambre noire dans des boîtes de Pétri sur papier filtre avec de l'eau à une température de 30° C. Après 3 jours de germination, les jeunes plantules ont été transplantées dans des pots de volume 0,5l sur les différents niveaux de dilution du substrat de sol et ceci dans une serre de culture en verre. Les plants ont été arrosés tous les jours pour maintenir le sol à la capacité au champ pendant 6 semaines. A la récolte (après six semaines) les racines fines (de diamètre inférieur à 1 mm) ont été prélevées et observées à loupe binoculaire (40x) suivant la méthode de Giovanetti et Mosses (1980) cité par Mardukhi *et al.* (2011). Les points de mycorhisation (étant défini comme une structure mycorhizienne qui est présente sur la racine) des racines ont été comptés après coloration au bleu

trypan (Ducouso *et al.*, 2004). Conformément à la loi du «tout ou rien» (Cochran, 1950 cité par Mardukhi *et al.* (2011), une plante est considérée comme mycorhisée lorsqu'on rencontre au niveau racinaire, au moins une structure mycorhizienne. Le *Most Probable Number* (MPN) des spores mycorhiziennes a été estimé au niveau des racines suivant le tableau de Cochran (1950) (Ba *et al.*, 2001 ; Ducouso *et al.*, 2004 ; Mardukhi *et al.*, 2011).

4.2.3 La diversité des champignons mycorhiziens à arbuscules (CMA) associés au tamarinier

La diversité naturelle des CMA associée aux racines de peuplements de tamarinier au Sénégal a été mise en évidence par le test suivant. Les échantillons de sol prélevés sous les sites des peuplements de tamarinier (Figure 4.1) ont été utilisés pour piéger et identifier les CMA. Deux types distincts d'inoculum ont été constitués à partir de chaque échantillon de terrain : (1) des échantillons de sols sans racines de tamarinier (prélevés sous les peuplements) ; et (2) des racines fines de tamarinier obtenues à partir d'échantillons de sols prélevés sous les peuplements.

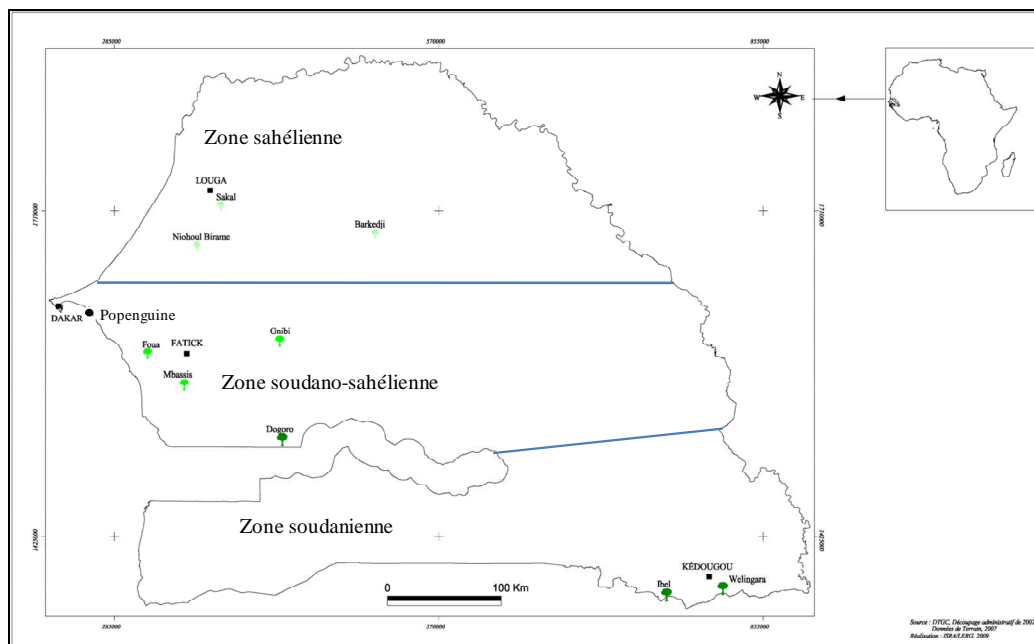


Figure 4.2: Sites de peuplement de tamariniers (échantillonnés) dans les différentes zones agro-écologiques du Sénégal (ISNAR, 1996)

De jeunes plants de tamarinier et des plantules de maïs ont été utilisés comme plantes pièges (Calvente *et al.*, 2004). Le substrat de sable de plage de mer obtenu à Popenguine (Sénégal) a été stérilisé et utilisé dans l'essai pour augmenter le volume du substrat. L'expérimentation a duré cinq (5) mois (juillet à novembre 2009) dans une serre où la température et l'humidité relative moyennes de 29°C et de 70% ont été respectivement enregistrées. A la fin de l'essai, le substrat du sol et les racines des plantes ont été prélevés et conservés dans des sachets en papier à 4 °C. Les spores des champignons mycorhiziens ont été isolées par la méthode d'extraction sous tamisage humide (Brundrett, 2004 ; Ramos-Zapata *et al.*, 2011).

Pour chaque traitement, 200 g de sol ont été utilisés pour l'extraction de spores. La méthode d'extraction sous tamisage humide consiste en un isolement des spores des champignons mycorhiziens à arbuscules par des micropipettes sous une loupe binoculaire (Stéréo Microscope, 20x/40x top- and transmitted-light). Les spores isolées ont été examinées au microscope et identifiées suivant le système de taxonomie proposé par Morton et Benny (1990) cité par Taylor et Alexander (2005). Les sites des descriptions originales ont été consultés et la morphologie des spores que nous avons collecté a été comparée et identifiée (http://invam.caf.wvu.edu/Myc_Info/Taxonomy/species.htm) basée sur les données de référence et établies par divers auteurs (Jansa *et al.*, 2002 ; Brundrett, 2004). Cinq spores de chaque genre taxonomique de champignon mycorhizien à arbuscules ont été identifiées par leur morphologie.

4.3 Analyse des données

Le taux de colonisation des racines par les mycorhizes a été obtenu par la formule (4.1). Les résultats des calculs ont été soumis à un test d'analyse de la variance (ANOVA, Statistix 8.1). Les valeurs moyennes ont été séparées avec le test de Student-Newman-Keuls. La diversité des champignons mycorhiziens à arbuscules et les données du sol ont été analysées en utilisant la méthode des composantes principales avec SAS. V7 (Brundrett, 2004). Pour représenter les corrélations complexes, nous avons utilisé les analyses des variables en composantes multiples (la régression des moindres carrés : PLS) effectuées sur les matrices de corrélation. Les résultats ont été exprimés sous forme de diagrammes.

4.4 Résultats et discussions

4.4.1 La colonisation des racines

Les taux de colonisation mycorhizienne des racines des arbres du peuplement par site et par zone agro-écologiques sont présentés au tableau 4.1.

Tableau 4.1 : Fréquence de colonisation des racines de tamariniers *in situ* dans les sites de peuplement au Sénégal et regroupée par zone agro-écologique

Sites	Taux de colonisation racinaire (%)	Zone agro-écologique	Taux de colonisation racinaire (%)
Sakal	12,21 ^{ab}	sahélienne	11,17 ^a
Barkedji	6,40 ^b		
Niokhoul	14,90 ^a		
Foua	4,04 ^c	soudano-sahélienne	5,72 ^b
Mbassis	11,63 ^{ab}		
Gnibi	1,5 ^c		
Ibel	2,45 ^c	soudanienne	3,85 ^b
Welingara	5,12 ^b		
Dogoro	3,98 ^c		
Probabilité (P <0,05)			

NB : Les valeurs présentant les mêmes lettres dans une même colonne ne sont pas significativement différentes pour la variable considérée.

Il apparaît que les racines des arbres de tamarinier de la zone sahélienne sont significativement les plus colonisées par les champignons mycorhiziens arbusculaires (11,17%) comparées à celles de la zone soudano-sahélienne et soudanienne. En outre, nos résultats ont montré une baisse de la fertilité des sols de la zone soudanienne vers la zone sahélienne (4,60% de matière organique du sol dans la zone soudanienne et 0,34 dans la zone du sahel) (Tableau 4.1).

Ces résultats corroborent ceux trouvés sur les vitroplants de banane au Cameroun (Tsané *et al.*, 2005). Ces vitroplants de bananiers étaient plus mycorhisés (taux de colonisation racinaire de 25%) sur un sol pauvre (faible niveau de carbone dans le sol) contrairement à un taux de 7% sur sol amendé en matière organique. Cela pourrait s'expliquer par une adaptation des plantes face aux stress subi de plusieurs natures (déficit hydrique par le faible niveau de rétention de l'eau du sol, du fait du faible niveau de fertilité du sol) dans un environnement aride (Déziel, 2000).

Tableau 4.2 : Caractéristiques physico-chimiques des sites de peuplement de tamarinier.

Sites	Zone Agro-écologique	pH-H ₂ O	N (total %)	Matière Organique (%)	P assimil. mg/kg	Texture du sol		
						sable (%)	limon (%)	Argile (%)
Sakal		6,53	0,03	0,34	14	92	6,2	1,8
Niokhoul	sahélienne	6,17	0,04	0,33	10	90,5	6,1	3,4
Barkedji		4,73	0,04	0,44	13	97,2	1,5	1,3
Foua		6,21	0,06	0,66	21	86,7	3,7	9,6
Mbassis	soudano-sahélienne	6,28	0,05	0,56	7	82,3	9,9	7,8
Gnibi		5,85	0,08	0,98	45	96,4	1,5	2,1
Ibel		6,94	0,41	4,60	248	68,3	21,4	10,3
Welingara	soudanienne	7,22	0,22	2,63	55	66,8	18,7	14,5
Dogoro		6,21	0,08	0,93	15	79,4	11,3	9,3

4.4.2 Le « Most Probable Number » (MPN) observé au niveau de la plante piège (*Zea mays*)

Dans la figure 4.3, les paramètres clés de caractérisation du sol tels que, le carbone total, le rapport carbone/azote (C/N), le phosphore assimilable la teneur en calcium et potassium, et la capacité d'échange cationique du sol (CEC) portés par l'axe t2 (76,1%) sont relativement éloignés du nombre de propagules des champignons mycorhiziens MPN, qui est porté par l'axe t1 (84,9%). L'analyse en composantes multiple

effectuée sur les matrices de corrélation (la méthode PLS) a fait ressortir que la densité des propagules viables (MPN) des champignons mycorhiziens arbusculaires, le pH du sol (eau), pH (KCl) et la teneur en sodium (Na) du sol sont étroitement liés. Des études antérieures (Ba *et al.*, 2001 ; Brundrett, 2004 ; Calvente *et al.*, 2004) ont montré que l'un des facteurs qui pourrait influencer le nombre de spores des champignons mycorhiziens présent dans le sol était le pH du sol. Cependant, dans nos analyses les différences de pH (ainsi que tous les autres facteurs abiotiques étudiés) observées entre les sites étudiés n'ont pas un impact significatif sur la densité des propagules des champignons mycorhiziens arbusculaires. Pourtant les différences de pH ont été documentées pour avoir un impact sur la viabilité des spores et non sur la symbiose mycorhizienne (Wang *et al.*, 2008). Nos résultats semblent corroborer ceux des travaux antérieurs qui n'indiquent pas une influence du pH du sol sur la symbiose mycorhizienne (McMillen *et al.*, 1998 ; Wang *et al.*, 2008).

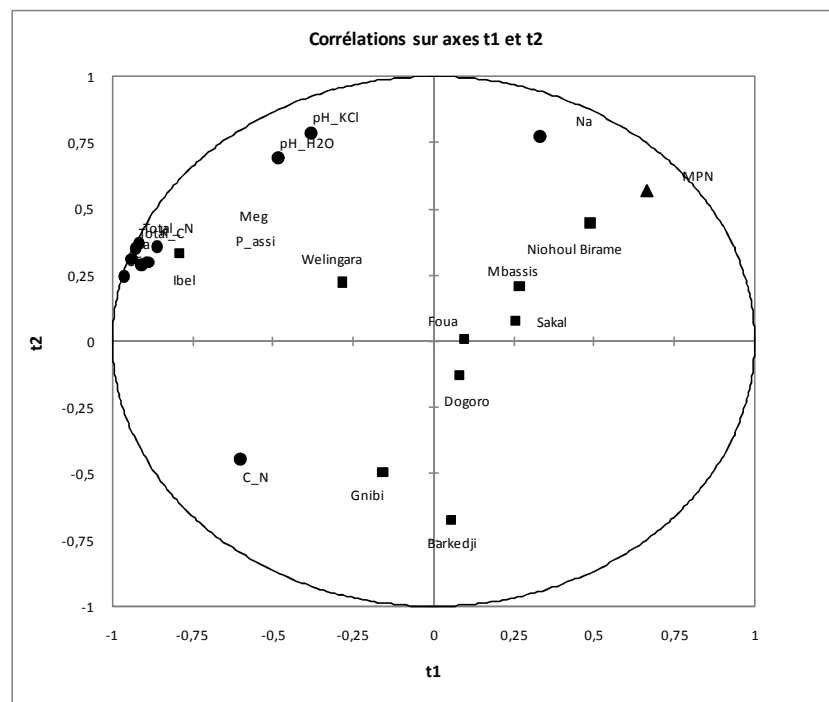


Figure 4.3 : Analyse en composante multiples des paramètres caractéristiques du sol en relation avec valeur du MPN (Most Propagule Number).

La texture sableuse (70-90% du taux de sable) des sols (en zone sahélienne, sites de Niokhoul et Sakal et celle de la zone soudano-sahélienne à Mbassis), est étroitement liée ($R^2 = 0,85$; $p \leq 0,05$) à la valeur du MPN. Ces résultats sont similaires à ceux observés sur le taux de colonisation des racines de tamarinier dans les mêmes sites. Le pourcentage de racines colonisées augmente de manière significative avec la valeur du MPN (Figure 4.4) ($R^2 = 0,93$; $p \leq 0,05$).

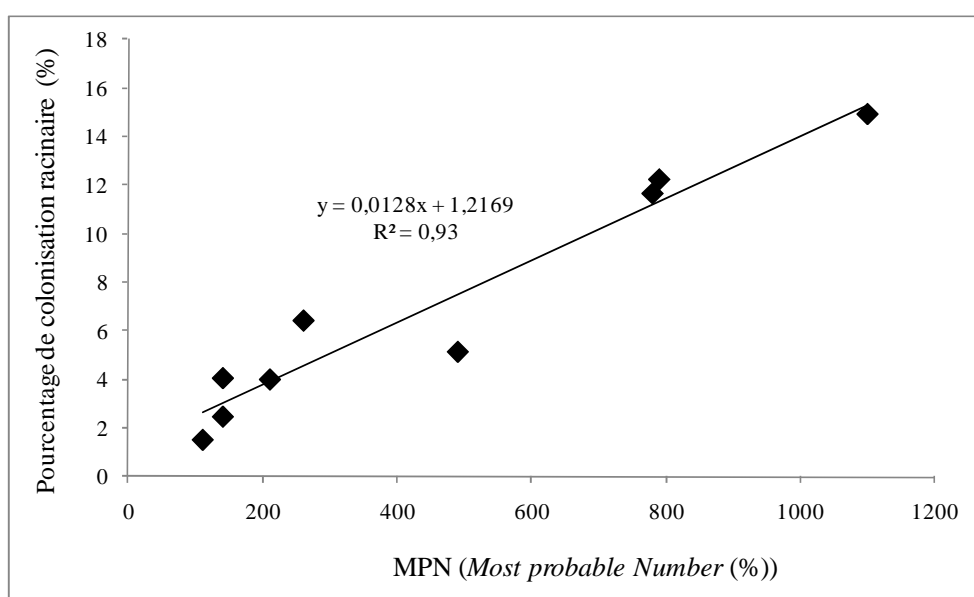


Figure 4.4 : Relation entre la valeur du MPN (%) et le pourcentage de colonisation racinaire des arbres de tamariniers *in situ*

Toutefois, dans les études antérieures, il a été démontré que le pourcentage des racines colonisées et les valeurs MPN sont influencés (négativement) par le type de l'espèce végétale ; Calvente *et al.*, 2004 ; Tsané *et al.*, 2005 ; Wang *et al.*, 2008 ; Ashwani *et al.*, 2010).

4.4.3 La diversité mycorhizienne

Trois types de genre des champignons mycorhiziens à arbuscules (*Acaulospora* spp., *Glomus* spp. et *Scutellospora* spp.) ont été identifiés en symbiose avec les racines du tamarinier dans cette étude. Ces champignons mycorhiziens ont été décrits par divers auteurs (Diallo, 1998 ; Alagely et Ogram, 2006 ;

Ramos-Zapata *et al.*, 2011). Ils ont été observés dans tous les sites de peuplements de tamariniers retenus pour la présente étude au Sénégal et mis en évidence quelque soit la culture piège utilisée (tamarinier ou maïs).

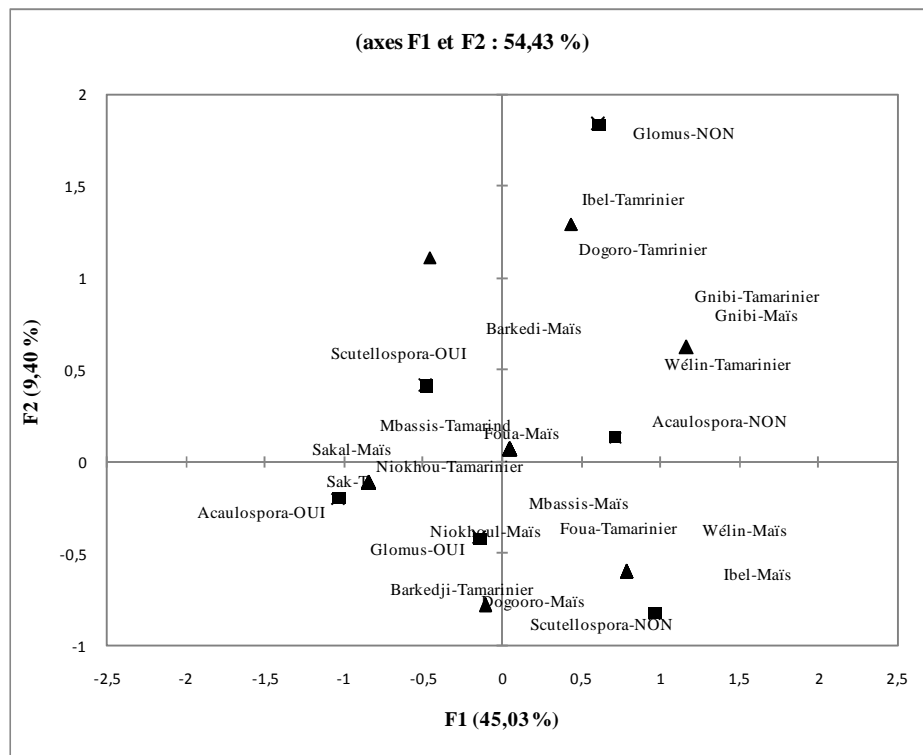


Figure 4.5 : Analyse factorielle en composantes principales de la diversité mycorhizienne associée au tamarinier

L'analyse factorielle en composantes multiples montre que ces trois genres mycorhiziens sont plus liés aux sites de Sakal, Niokhoul et Mbassis, caractérisés par des sols sablonneux (70-90%) (Figure 4.5). *Glomus* spp. et *Scutellospora* spp. sont liés à l'axe 1 (45,03%), et l'axe 2 (9,40%) est couverte par *Acaulospora* spp.

Ces résultats montrent que *T. indica* a un large spectre d'association mycorhizienne, ce qui a été également constaté par des études antérieures (Ba *et al.*, 2001 ; El-Siddig *et al.*, 2006 ; Alagely et Ogram, 2006). Nos résultats n'ont pas pu identifier un champignon mycorhizien unique, associé au tamarinier. Ceci pourrait

peut-être s'expliquer par le fait que, notre identification s'est limitée au niveau genre. Un affinement par les outils moléculaires aurait mis en évidence des souches spécifiques. Des résultats similaires ont été obtenus par différents auteurs (El-Siddig *et al.*, 2006 ; Wang *et al.*, 2008), qui ont identifié au total 13 espèces de champignons mycorhiziens à arbuscules associées au *T. indica*.

Des études menées en RDC (République Démocratique du Congo) dans trois sites retenus, 91 racines des espèces différentes des plantes ont été échantillonnées réparties dans 29 familles parmi ces espèces on en dénombre 82 qui en sont porteuses d'endomycorhizes. Ainsi comme la plupart des espèces ligneuses tropicales, le tamarinier est le plus souvent associé aux champignons endomycorhiziens du genre *Glomus* (Ba *et al.*, 2001 ; El-Siddig *et al.*, 2006).

L'observation des systèmes racinaires de 10 espèces ligneuses prélevées dans la région de Gouré (au Niger) a révélé une endomycorhisation vésiculo-arbusculaire chez 90% de ces espèces. A l'exception de *Maerua crassifolia*, toutes les espèces prélevées sont mychorisées (Guissou, 2009). Le taux de colonisation varie d'une espèce à une autre. Cette colonisation est totale chez *Bauhinia rufescens* et *Prosopis chilensis*, un taux élevé est observé au niveau d'*Acacia nilotica*, de *Prosopis juliflora* et d'*Acacia raddiana*, avec respectivement 97%, 83% et 97% (Diallo, 1998 ; Wang *et al.*, 2008 ; Mardukhi *et al.*, 2011). *Leptadenia pyrotechnica* est l'espèce la plus faiblement mycorhizée (16,7%). Pour la majeure partie des cas, plusieurs espèces du genre *Glomus* en sont responsables. Ces résultats confirment la prédominance du genre *Glomus* en zone aride tropicale, surtout chez des espèces à large spectre mycorhizogène comme le tamarinier.

En milieu aride de l'Afrique, les champignons mycorhiziens à arbuscules les plus connus appartiennent aux genres *Glomus* spp. et *Gigaspora* spp. (Maksoud *et al.*, 1994 ; Jansa *et al.*, 2002). Les spores des *Glomus* spp. et *Acaulospora* spp. sont significativement les plus abondantes ($P < 0,05$) que celles des *Scutellospora* spp. dans tous les sites de peuplements de tamarinier étudiés et ceci corrobore les études antérieures (Ba *et al.*, 2001 ; El-Siddig *et al.*, 2006). Il a été prouvé par Bouamri *et al.* (2006) que le genre *Glomus* est considéré comme le plus associé aux plantes ligneuses des zones sèche de l'Afrique, de tous les champignons mycorhiziens à arbuscules. Le *Glomus* est un champignon symbiotique obligatoire et qui n'est pas très spécifique à l'hôte (Bouamri *et al.*, 2006 ; Wang *et al.*, 2008).

Il a été également constaté que le genre *Acaulospora* tolère plusieurs types de sol et s'associe ainsi à diverses espèces végétales hôtes (Uhlmann *et al.*, 2006). Le genre *Scutellospora* est le plus abondant en nombre de

propagules viables observées. Ce résultat est similaire aux conclusions de diverses études menées par plusieurs auteurs et qui ont constaté que le genre *Scutellospora* est essentiellement observé dans des sols labourés (Shepherd *et al.*, 1995). Nos résultats contredisent ceux trouvés par d'autres auteurs (Jansa *et al.*, 2002 ; Wang *et al.*, 2008), qui indiquent que les genres *Acaulospora* et *Scutellospora* ont tendance à être plus nombreux que *Glomus* dans un sol non labouré tel que les parcs de peuplement de tamarinier. Le mode de gestion du sol pourrait donc influencer la diversité mycorhizienne arbusculaire et le taux de symbiose mycorhizienne des plantes qui s'y trouvent (Ülle *et al.*, 2004 ; Uhlmann *et al.*, 2006).

Il a été démontré par plusieurs auteurs que la plante est capable de réguler son état mycorhizien selon la quantité de phosphore assimilable, lorsque le coût d'entretien des mycorhyzes dépasse le bénéfice procuré par le champignon (Bouamri *et al.*, 2006 ; Leye *et al.*, 2009). Cela expliquerait le faible taux de mycorhization observé chez les plantes cultivées sur milieu riche en phosphore. En effet, lorsque le phosphore soluble est présent en assez forte quantité, même si le champignon mycorhizien induit toujours son accumulation dans la plante, il n'aurait plus d'influence sur la croissance (Ambouta *et al.*, 2009 cité par Leye *et al.* 2009 ; Hodge *et al.*, 2010). Cependant, dans les sols où les concentrations en phosphore sont extrêmement faibles, de petits amendements peuvent influencer positivement la colonisation fongique. Les résultats de notre étude confirment d'ailleurs cette hypothèse, en effet le phosphore assimilable porté par l'axe 2 (76,1%) s'oppose au MPN porté par l'axe 1 (84,9%) (Figure 4.3).

Ainsi, la teneur en phosphate du sol aurait des effets variés sur la symbiose mycorhizienne et sur le champignon mycorhizien. La réduction de la colonisation du champignon résulterait d'une concentration en phosphore disponible trop élevée, ou au contraire trop faible (Fernando *et al.*, 2010 ; Romina et Chaverri, 2010). De plus, la présence d'une source de phosphore induirait une baisse générale de l'absorption des micronutriments, Fe, Mn, Cu... Cette baisse serait partiellement compensée lorsque la plante est mycorhizée.

En conclusion, cette étude souligne l'importance de l'exploration et l'exploitation de la diversité naturelle des champignons mycorhiziens arbusculaires comme point de départ pour formuler des inoculas comme bio-fertilisants.

Chapitre 5

Effets de l'inoculation mycorhizienne sur le comportement agro-physiologique des écotypes du tamarinier (*Tamarindus indica* L.) au Sénégal.

Adapté à partir de : Bourou, S., Ndiaye, F., Diouf, M. & Van Damme, P. (2011), effets de l'inoculation mycorhizienne sur le comportement agro-physiologique des écotypes du tamarinier (*Tamarindus indica* L) au Sénégal, publiée à la revue Journal of Applied Biosciences, 46, 3093-3102.

5.1 Introduction

Dans le cadre d'une approche de la relance de la croissance économique mondiale, l'agriculture joue un rôle prépondérant. La contribution de l'agriculture dans cette relance se définit en plusieurs composantes dont notamment celle de l'accroissement des revenus des populations rurales en zone tropicale. Le constat révèle que dans la partie subsaharienne de l'Afrique, la nécessité de la diversification agricole s'impose (PAM, 2003).

En Afrique, un déséquilibre entre la production alimentaire (dont l'augmentation réalisée est de 2% par an) et la croissance de la population 3% par an a été mis en évidence ces dernières années (FAO, 2008 ; Gao *et al.*, 2009 ; Zhu *et al.*, 2011). Ceci a pour conséquence immédiate une production agricole insuffisante et par conséquent une installation de crises alimentaires et de famines. Plusieurs contraintes entravent l'augmentation de la production agricole. Un des principaux facteurs limitant la production agricole est la sécheresse (FAO, 2008). En effet, elle constitue une entrave majeure à la production agricole et forestière dans les zones arides et semi-arides d'Afrique de l'Ouest (Sarr *et al.*, 2005). Elle se traduit par une faible disponibilité en eau, notamment dans le transport et l'accumulation de solutés nécessaires au métabolisme des végétaux (Annerose, 1990 ; Thiam *et al.*, 2011 ; Carter et Nippert, 2012).

Au Sahel (zone caractérisée par une pluviométrie déficitaire à travers l'année, en moyenne 250 à 400 mm/an), les populations vivent dans des conditions très difficiles et fournissent beaucoup d'efforts afin de tirer le maximum de profit de l'agriculture mais surtout de leurs ressources naturelles pour leur survie (Thiam *et al.*, 2011). Les arbres fruitiers forestiers par exemple aident à assurer le bien-être des populations et en particulier celles du milieu rural. Les fruits et les feuilles issus des espèces forestières sont consommés par les ménages (De Caluwé *et al.*, 2010 ; Buchmann *et al.*, 2010 ; Termote *et al.*, 2010a). Le régime alimentaire des sahéliens en milieu rural est dominé par les céréales riches en amidon mais qui sont relativement pauvres en éléments minéraux et en vitamines (De Caluwe *et al.*, 2010).

Les fruits des arbres et leurs feuilles fournissent des oligo-éléments, des vitamines et des protéines qui sont rares dans les céréales mais indispensables pour maintenir l'équilibre alimentaire (Assogbadjo, 2006). *Balanites aegyptiaca*, *Parkia biglobosa*, *Tamarindus indica*, *Adansonia digitata* ou *Ziziphus mauritiana* entre autre sont les espèces fruitières à usages multiples les plus connues des systèmes agro-forestiers des zones

arides et semi-arides de la zone tropicale d'Afrique (Ba *et al.*, 2001). Elles fournissent des fruits comestibles qui sont aussi une source de revenus pour les paysans, notamment en période de soudure (De Caluwé *et al.*, 2010).

Le tamarinier (*Tamarindus indica* L.) apparaît ainsi parmi les plus importants (au 5^{ème} rang en zone sahélienne d'Afrique et le 2^{ème} après le baobab au Sénégal) (Ndiaye *et al.*, 2002) et plusieurs vertus lui sont reconnus (De Caluwé *et al.*, 2010 ; Buchmann *et al.*, 2010). Les fruits se présentent sous forme de gousses à pulpe acide et fibreuse très utilisés dans l'alimentation (condiment, jus), très riches en phosphore et en vitamine B1 (thiamine) (voir chapitre 1). Il faut noter que *T. indica* est une légumineuse, à qui on ne reconnaît pas la capacité de développer une symbiose avec les rhizobiums. Il n'est donc pas fixateur d'azote atmosphérique (Ba *et al.*, 2001). Il est par ailleurs caractérisé par une croissance végétative assez lente (El-Siddig *et al.*, 2006 ; Bowe, 2007 ; Diallo *et al.*, 2008).

A l'instar des autres ligneux fruitiers du Sahel, le tamarinier dépend des mycorhizes pour sa croissance juvénile, en particulier des souches telles que *Gigaspora margarita*, *G. aggregatum*, *Glomus fasciculatum*, *G. mosseae*, *Acaulospora* spp., *Scutellospora* spp. et *Pisolithus tinctorius* (Ba *et al.*, 2001 ; Bourou *et al.*, 2010). Le genre *Glomus* est le plus connu des souches mycorhiziennes dans l'association avec les espèces végétales du Sahel (Wang *et al.*, 2008 ; Castillo *et al.*, 2011). En situation de stress hydrique, l'inoculation de ces arbres fruitiers par des champignons mycorhiziens pourrait améliorer leur tolérance au stress hydrique et leur survie aux premiers stades de développement et ainsi accroître leur efficacité d'utilisation d'eau et la nutrition minérale (Ba *et al.*, 2001 ; Ducousso *et al.*, 2004 ; Mardukhi *et al.*, 2011).

L'objectif du présent travail a été d'étudier le comportement de quelques provenances de tamarinier prélevées dans les trois zones agro-écologiques du Sénégal en association avec deux espèces de champignon mycorhizien du genre *Glomus* (*aggregatum* et *mosseae*) en situation de stress hydrique variée. De manière spécifique il s'agira de : (1) évaluer les effets des souches mycorhiziennes sur les variables de croissance de quelques écotypes de tamarinier du Sénégal en condition d'alimentation hydrique variée ; et (2) caractériser l'influence de l'inoculation mycorhizienne sur le fonctionnement éco-physiologique de ces écotypes de tamarinier du Sénégal.

5.2 Matériels et méthodes

Conduite de l'essai

L'étude a été menée dans la serre expérimentale du CERAAS (Centre d'Étude Régional pour l'Amélioration de l'Adaptation à la Sécheresse) à Thiès au Sénégal. Elle a concerné deux types de matériels : végétal et fongique. L'essai a duré 4 mois (du 1^{er} avril au 5 juillet 2010) et a été conduit sur un substrat de sable stérilisé à l'autoclave à 120 °C (Gerdemann et Trappe, 1974 cité par Ramos-Zapata *et al.*, 2011), pendant 2 h et en deux jours consécutifs. Chaque pot (30 x 28 cm) a été rempli avec 10 kg de sol et arrosé jusqu'à la capacité au champ. L'inoculation a été effectuée suivant le protocole de Ba *et al.* (2001), 5 jours après germination des plantules de *T. indica*, à une quantité de 20 g (d'inoculum mycorhizien) par pot de culture. Les plants ont été arrosés jusqu'à la capacité au champ après chaque deux jours (48h), pendant leur phase de développement jusqu'à la fin de l'expérimentation (4 mois).

5.2.1 Matériel végétal

Des graines de différents écotypes de tamariniers ont été obtenues de fruits mûrs et secs collectés sur les arbres dans trois sites choisis au hasard (au sein d'une même zone agro-écologique) et ceci dans trois zones agro-écologiques du Sénégal. Les sites choisis étaient distants de 50 km au minimum tandis que les arbres choisis pour la récolte des graines devaient être distants de 100 m (au minimum) l'un de l'autre. Ces précautions ont été prises pour réduire l'effet l'autogamie observé sur le tamarinier (Diallo *et al.*, 2008). Les caractéristiques des sites de collecte des fruits sont résumées dans le tableau 5.1 ci-dessous. Les graines ont été obtenues au laboratoire après lavage à l'eau de robinet des fruits. Elles ont ensuite été traitées à l'acide sulfurique concentré (95%) pendant 10 minutes dans le but de lever la dormance tégumentaire (Danthu *et al.*, 1996 ; Ndiaye *et al.*, 2002 ; Diallo *et al.*, 2007 ; Bowe, 2007).

Tableau 5.1 : Sites de collecte du matériel végétal

Zones agro-écologiques	Sites de collecte	Coordonnées Géographiques (GPS)	
		Longitude (Ouest)	Latitude (Nord)
sahélienne	Sakal	16,13687	15,50480
	Niokhoul	16,33032	15,17849
	Barkedji	14,87065	15,28448
soudano-sahélienne	Foua	14,33122	16,72578
	Mbassis	16,42623	14,08452
	Gnibi	15,65049	14,43506
soudanienne	Ibel	12,51609	12,37785
	Wélingara	12,45882	12,05528
	Dogoro	15,62574	13,64686

5.2.2 Matériels fongiques

Considérant les résultats des études antérieures qui avaient montré que le tamarinier a un large spectre d'association mycorhizienne (El-Siddig *et al.*, 2006 ; Bourou *et al.*, 2010), nous avons choisi spécifiquement deux souches du genre *Glomus* : *Glomus aggregatum* et *G. mosseae*. En effet, le genre *Glomus* est considéré comme le plus abondant de tous les champignons mycorhiziens à arbuscules en zone tropicale aride (Maksoud *et al.*, 1994 ; Ba *et al.*, 2001 ; Jansa *et al.*, 2002 ; Uhlmann *et al.*, 2006 ; Ashwani *et al.*, 2010 ; Shamshiri *et al.*, 2011) et avait aussi été trouvé vivre en association avec le tamarinier au Sénégal (voir chapitre 4).

Les souches mycorhiziennes ont été multipliées préalablement en utilisant le maïs (*Zea mays*) comme plante hôte (Jansa *et al.*, 2002 ; Uhlmann *et al.*, 2006). Elles ont été obtenues avant leur multiplication au près du Laboratoire de Biotechnologie des Champignons (LBC) de l'Université Cheikh Anta Diop de Dakar (UCAD) au Sénégal. L'objectif de la multiplication a été d'accroître la quantité de l'inoculum viable. La viabilité et la qualité de l'inoculum ont été testées au Laboratoire de Biotechnologie des Champignons (LBC) de l'Université Cheikh Anta Diop de Dakar (UCAD).

5.2.3 Dispositif expérimental

Un dispositif en blocs complets randomisé a été adopté avec trois répétitions. Le plan expérimental est résumé dans la figure 5.1 ci-dessous.

Nbre Trait.	BLOC III			BLOC II			BLOC I		
	Rép_1	Rép_2	Rép_3	Rép_1	Rép_2	Rép_3	Rép_1	Rép_2	Rép_3
1	SoT/ETM	SoT/ETM	SoT/ETM	SsT/ETM	SsT/ETM	SsT/ETM	SsGa/STR	SsGa/STR	SsGa/STR
2	SaGm/ETM	SaGm/ETM	SaGm/ETM	SaT/ETM	SaT/ETM	SaT/ETM	SaGa/ETM	SaGa/ETM	SaGa/ETM
3	SsGa/ETM	SsGa/ETM	SsGa/ETM	SoGa/ETM	SoGa/ETM	SoGa/ETM	SsT/ETM	SsT/ETM	SsT/ETM
4	SoGa/ETM	SoGa/ETM	SoGa/ETM	SoGm/STR	SoGm/STR	SoGm/STR	SsGa/ETM	SsGa/ETM	SsGa/ETM
5	SoT/STR	SoT/STR	SoT/STR	SaGa/STR	SaGa/STR	SaGa/STR	SoGa/ETM	SoGa/ETM	SoGa/ETM
6	SsT/STR	SsT/STR	SsT/STR	SaGm/STR	SaGm/STR	SaGm/STR	SaGa/STR	SaGa/STR	SaGa/STR
7	SsGm/STR	SsGm/STR	SsGm/STR	SsGa/ETM	SsGa/ETM	SsGa/ETM	SsGm/ETM	SsGm/ETM	SsGm/ETM
8	SsGm/ETM	SsGm/ETM	SsGm/ETM	SoT/ETM	SoT/ETM	SoT/ETM	SoT/ETM	SoT/ETM	SoT/ETM
9	SoGm/STR	SoGm/STR	SoGm/STR	SsGm/ETM	SsGm/ETM	SsGm/ETM	SaGm/ETM	SaGm/ETM	SaGm/ETM
10	SaGa/ETM	SaGa/ETM	SaGa/ETM	SsT/STR	SsT/STR	SsT/STR	SoGm/ETM	SoGm/ETM	SoGm/ETM
11	SaGa/STR	SaGa/STR	SaGa/STR	SsGm/STR	SsGm/STR	SsGm/STR	SoGm/STR	SoGm/STR	SoGm/STR
12	SsT/ETM	SsT/ETM	SsT/ETM	SoGm/ETM	SoGm/ETM	SoGm/ETM	SaGm/STR	SaGm/STR	SaGm/STR
13	SaT/ETM	SaT/ETM	SaT/ETM	SoT/STR	SoT/STR	SoT/STR	SsGm/STR	SsGm/STR	SsGm/STR
14	SoGm/ETM	SoGm/ETM	SoGm/ETM	SsGa/STR	SsGa/STR	SsGa/STR	SoGa/STR	SoGa/STR	SoGa/STR
15	SoGa/STR	SoGa/STR	SoGa/STR	SaGm/ETM	SaGm/ETM	SaGm/ETM	SoT/STR	SoT/STR	SoT/STR
16	SaT/STR	SaT/STR	SaT/STR	SoGa/STR	SoGa/STR	SoGa/STR	SsT/STR	SsT/STR	SsT/STR
17	SaGm/STR	SaGm/STR	SaGm/STR	SaGa/ETM	SaGa/ETM	SaGa/ETM	SaT/ETM	SaT/ETM	SaT/ETM
18	SsGa/STR	SsGa/STR	SsGa/STR	SaT/STR	SaT/STR	SaT/STR	SaT/STR	SaT/STR	SaT/STR

Figure 5.1 : Plan du dispositif expérimental

SoT/ETM (écotype soudanien non inoculé en condition d'alimentation hydrique optimale) ;

SaGm/ETM (écotype sahélien inoculé à *G. mosseae* en condition d'alimentation hydrique optimale) ;

SsGa/ETM (écotype soudano-sahélien inoculé *G. aggregatum* en condition d'alimentation hydrique optimale) ;

SoGa/ETM (écotype soudanien inoculé à *G. aggregatum* en condition d'alimentation hydrique optimale) ;

SoT/STR (écotype soudanien non inoculé en condition de stress hydrique) ;

SsT/STR (écotype soudano-sahélien non inoculé en condition de stress hydrique) ;

SsGm/STR (écotype soudano-sahélien inoculé à *G. mosseae* en condition de stress hydrique) ;

SsGm/ETM (écotype soudano-sahélien inoculé à *G. mosseae* en condition d'alimentation hydrique optimale) ;

SoGm/STR (écotype soudanien inoculé à *G. mosseae* en condition de stress hydrique) ;

SaGa/ETM (écotype sahélien inoculé à *G. aggregatum* en condition d'alimentation hydrique optimale) ;

SaGa/STR (écotype sahélien inoculé à *G. aggregatum* en condition de stress hydrique) ;

SsT/ETM (écotype soudano-sahélien non inoculé en condition d'alimentation hydrique optimale) ;

SaT/ETM (écotype sahélien non inoculé en condition d'alimentation hydrique optimale) ;

SoGm/ETM (écotype soudanien inoculé à *G. mosseae* en condition d'alimentation hydrique optimale) ;

SoGa/STR (écotype soudanien inoculé à *G. aggregatum* en condition de stress hydrique) ;

SaT/STR (écotype sahélien non inoculé en condition de stress hydrique) ;

SaGm/STR (écotype sahélien inoculé à *G. mosseae* en condition de stress hydrique) ;

SsGa/STR (écotype soudano-sahélien inoculé à *G. mosseae* en condition de stress hydrique) ;

Nbre Trait. = Nombre de Traitements ; Rép_n = Répétition n.

Le dispositif expérimental était constitué de trois facteurs :

- ❖ le matériel végétal à 3 écotypes : soudanien (So), soudano-sahélien (Ss) et sahélien (Sa) ;
- ❖ le matériel fongique : *Glomus mosseae* (Gm), *G. aggregatum* (Ga) et le témoin (T) ; et
- ❖ le régime hydrique : les plants ont été repartis en deux groupes, ceux en conditions d'alimentation hydrique optimale (ETM) et les plants stressés (STR) ayant subi un stress hydrique progressif (-1,74 MPa) appliqué par une suspension d'arrosage (Dramé, 2005 ; Falalou, 2006 ; Schmidt *et al.*, 2011 ; Carter et Nippert, 2012) pendant 13 jours.

5.2.4 Hypothèses et paramètres observés

Deux hypothèses ont été émises pour cette étude : (1) la mycorhisation n'améliore ni l'indice de résistance au stress hydrique ni l'efficacité d'utilisation de l'eau (EUE) chez le *T. indica* (Guissou *et al.*, 2001 ; Guissou, 2009 ; Shamshiri *et al.*, 2011) ; et l'hypothèse (2) consiste au fait que le *T. indica* est associé aux mycorhizes pendant sa phase de croissance et qui améliore sa capacité d'adaptation au stress hydrique (El-Siddig *et al.*, 2006 ; Diallo *et al.*, 2007 ; Diallo *et al.*, 2008 ; Arafat et Abdel, 2011).

Pour vérifier ces deux postulats, deux groupes de paramètres ont été suivis ou calculés. Les paramètres morphologiques (taille des plants, le diamètre au collet, la biomasse aérienne et racinaire) et les paramètres éco-physiologiques (la photosynthèse nette, la conductance stomatique, l'efficacité d'utilisation de l'eau instantanée, la transpiration, la concentration du CO₂ interne).

Les paramètres morphologiques

La taille/hauteur et le diamètre au collet des plants ont été mesurés avec une fréquence de 7 jours à partir du 5^{ème} Jours Après Semis).

Toutes ces mesures de la hauteur et du diamètre au collet ont été faites à l'aide d'une règle graduée ($\pm 0,1$ cm) et à l'aide d'un pied à coulisse (Transitek, modèle LCD 5 digit) de précision ($\pm 0,01$ mm) (Photo 5.1). La biomasse aérienne et racinaire a été obtenue à la fin de l'essai (115 Jours Après Semis).



Photo 5.1 : Mesure du diamètre au collet

A la fin de l'essai, les plants ont été dépotés et les racines extraites soigneusement par lavage à l'eau. La partie aérienne a été sectionnée de la partie racinaire, puis les deux parties (aérienne et racinaire) ont été mises à l'étuve à 65°C pendant 72 h et ensuite pesées à l'aide d'une balance de précision (Metler Toledo, modèle PL-S).

Les paramètres éco-physiologiques

On a suivi/calculé une cohorte de variables éco-physiologiques qui renseignent sur l'état physiologique des plantes en réponse à un stress hydrique. Il s'agit de la photosynthèse nette (A), la transpiration foliaire (E), le flux de CO_2 interne (Ci), la conductance stomatique (Gs) et l'efficacité d'utilisation de l'eau instantanée (EUEi) qui a été calculée à partir de la formule de Jones (1992) cité par Roussel (2008).

$$\text{EUEi} = \frac{A}{E} \quad (5.1) ;$$

où A représente la photosynthèse nette et E la transpiration foliaire.

L'analyseur de CO₂ LCI (ADC BioScientific Ltd, modèle EN110DB), a été utilisé pour la mesure de ces paramètres éco-physiologiques. Il est constitué d'un système portable et intégré de mesure des échanges gazeux foliaires (CO₂ et H₂O) des plantes. Il opère en mode ouvert et il est alimenté en permanence par de l'air prélevé à 4 m du sol à l'aide d'une canne. On mesure en continu les différences de concentrations en CO₂ et H₂O entre l'entrée et la sortie de l'enceinte de la chambre de mesure foliaire de l'analyseur de CO₂. Les teneurs en CO₂ et vapeurs d'eau ont été mesurées par des analyseurs infrarouges intégrés à l'analyseur de CO₂ LCI. Les températures de la feuille et de la chambre de mesure sont déterminées par le bilan énergétique. Un capteur d'humidité et un quantum-mètre sont associés à la chambre (PLC), permettant respectivement la mesure de l'humidité relative de la chambre et du rayonnement photosynthétiquement actif (PAR).

Les mesures ont été effectuées sur la troisième feuille (à partir du bourgeon apical) des jeunes plants à la fréquence suivante : 5, 13, 34, 61 et 90^{ème} JAS (le dernier jour de l'application du stress hydrique) et au 97^{ème} JAS. Le stress hydrique a été évalué au niveau de la plante progressivement à l'aide de la mesure du potentiel hydrique à la chambre à pression type Scholander (modèle analogique) (Jones, (1992) cité par Roussel, 2008 ; Seghieri, 2010). Le potentiel hydrique des plants stressés a été mesuré chaque 4 jour pendant la période d'application du stress hydrique (par suspension de l'arrosage).

5.3 L'analyse statistique

L'analyse statistique des données a été effectuée par le logiciel Statistix (8.1). Toutes les données ont été testées pour la normalité et l'homogénéité des variances à l'aide du test de Levene avant l'analyse de la variance. La comparaison des moyennes a été faite à l'aide du test de Newman-Keul ($P < 0,05$). Les coefficients de corrélation de Spierman ont été calculés entre toutes les variables.

5.4 Résultats

Les résultats obtenus n'ont pas révélés de différences significatives de réponse à l'inoculation mycorhizienne entre écotypes/provenances de tamarinier. Ainsi, quelque soit la variable (physiologique ou morphologique) considérée, il n'existe aucune différence significative entre les provenances des zones sahélienne, soudano-sahélienne et soudanienne.

Par ailleurs, l'on a noté des différences significatives pour les variables morphologiques (diamètre au collet et hauteur des plants) et les paramètres éco-physiologiques (photosynthèse nette, conductance stomatique et l'efficacité d'utilisation de l'eau) entre les plants inoculés et les témoins.

5.4.1 Les paramètres morphologiques (le diamètre au collet et la hauteur des plants)

La hauteur des plants

L'évolution de cette variable a été suivie au cours de l'essai (Tableau 5.2). Toutefois, vers la fin de l'essai on a constaté un ralentissement de la croissance en hauteur et qui favorisait l'apparition de branches latérales. Il est important de tenir compte du fait que l'expérimentation ayant été conduite en pot (dans une serre), les potentialités de croissance en hauteur des plants n'ont certainement pas pu s'exprimer totalement.

Tableau 5.2 : Hauteur (cm) des plants inoculés au *Glomus aggregatum* et *G. mosseae*, et le témoin

	15	22	36	50	64	78	92
	JAS	JAS	JAS	JAS	JAS	JAS	JAS
Témoin	10,4 ^a	11,8 ^a	14,6 ^a	19,0 ^a	25,4 ^a	32,5 ^a	40,0 ^a
<i>G. mosseae</i>	10,3 ^a	11,8 ^a	14,3 ^a	18,5 ^a	26,0 ^a	32,7 ^a	41,3 ^a
<i>G. aggregatum</i>	10,6 ^a	12,2 ^a	15,7 ^a	19,9 ^b	27,0 ^b	34,5 ^b	42,8 ^b

Probabilité (P < 0,05)

NB : Les valeurs présentant les mêmes lettres dans une même colonne ne sont pas significativement différentes pour la variable considérée. JAS : Jours Après Semis.

A partir de 50^{ème} JAS correspondant au 41^{ème} jour après inoculation on a constaté, une croissance significativement (P < 0,05) plus élevée des plants inoculés à *G. aggregatum* comparée à celle des plants inoculés à *G. mosseae* et le témoin. Cette différence est restée maintenue jusqu'aux 92^{ème} JAS, date de la dernière mesure de l'essai.

Le diamètre au collet

L'évolution du diamètre au collet est similaire à celui de la hauteur. A partir de 64^{ème} JAS (55^{ème} jours après inoculation), on observe une différence significative ($P < 0,05$) entre les plants inoculés (*Glomus aggregatum* et *G. mosseae*) et le témoin (Tableau 5.3).

Tableau 5.3 : Diamètre au collet (cm) des plants inoculés au *G. aggregatum* et *G. mosseae*, et le témoin

	15	22	36	50	64	78	92
	JAS	JAS	JAS	JAS	JAS	JAS	JAS
Témoin	1,1 ^a	1,2 ^a	1,6 ^a	2,0 ^a	2,3 ^b	3,0 ^b	3,5 ^b
<i>G. mosseae</i>	1,0 ^a	1,2 ^a	1,5 ^a	2,2 ^a	2,5 ^a	3,2 ^a	3,8 ^a
<i>G. aggregatum</i>	1,0 ^a	1,2 ^a	1,5 ^a	2,4 ^a	2,8 ^a	3,4 ^a	4,0 ^a
Probabilité ($P < 0,05$)							

NB : Les valeurs présentant les mêmes lettres dans une même colonne ne sont pas significativement différentes pour la variable considérée. JAS : Jours Après Semis.

Contrairement à la hauteur des plantes, l'effet de l'inoculation intervient un peu plus tard (14 jours). Toutefois, aucune différence significative ($P > 0,05$) n'est observée entre les plantes inoculées à *Glomus aggregatum* et celles inoculées à *G. mosseae* pour cette variable.

5.4.2 Les paramètres éco-physiologiques

Les résultats des analyses statistiques effectuées ne montrent pas de différence entre les provenances de tamarinier pour les paramètres tels que la photosynthèse nette, la conductance stomatique et l'efficacité d'utilisation de l'eau instantanée. On a pu observer un effet significatif ($P < 0,05$) (43^{ème} JAS) de l'inoculation pour les paramètres éco-physiologiques.

Le déficit hydrique appliqué par suspension de l'arrosage des plants a permis d'atteindre un potentiel hydrique foliaire de -1,74 MPa (arrosage suspendu pendant 13 jours). Cet effet du déficit hydrique a été significatif ($P < 0,05$) sur les variables physiologiques observées (la photosynthèse nette, la conductance stomatique et l'efficacité d'utilisation de l'eau instantanée).

5.4.3 La photosynthèse nette (Pn)

Le facteur Pn (photosynthèse nette) a une évolution croissante jusqu'au 71^{ème} JAS, date de l'application du stress hydrique. Après cette date, l'on observe une baisse rapide du processus de photosynthèse. Cette chute de l'activité photosynthétique s'explique par une fermeture progressive des stomates foliaires suite à l'application du stress hydrique.

Une différence significative ($P < 0,05$) a été observée entre les plants inoculés au *Glomus aggregatum*, et ceux inoculés à *Glomus mosseae* et le témoin (Figure 5.2).

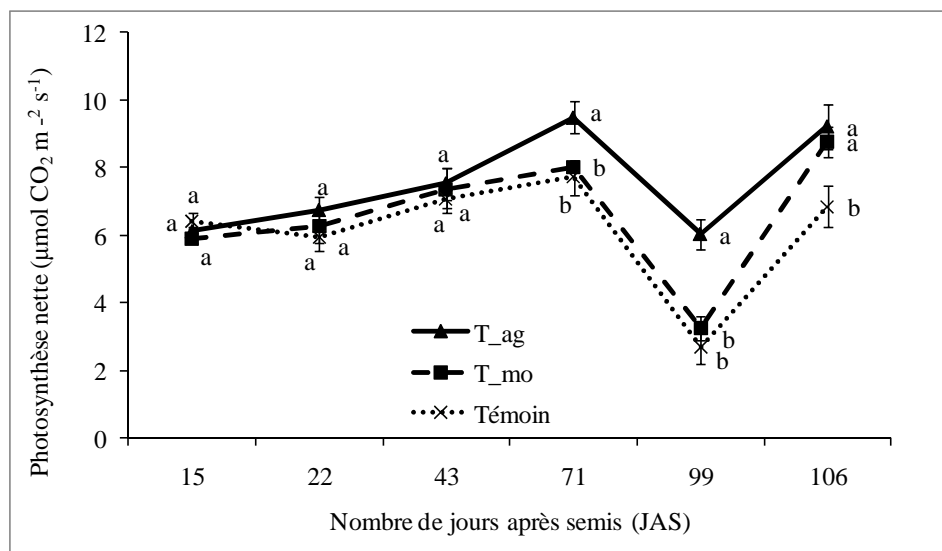


Figure 5.2 : Comparaison de la photosynthèse nette moyenne des plants inoculés à *G. aggregatum* (T_ag), *G. mosseae* (T_mo) et le témoin. Les barres verticales représentent les écart-types.

A la réhydratation (84^{ème} JAS) des plants, une différence significative ($P < 0,05$) entre les plants inoculés et le témoin a été constatée. La réduction de la perte en eau induite par la fermeture des stomates et associée à l'amélioration de l'alimentation hydrique et minérale des plants mycorhisés pourraient expliquer cette différence observée entre les plants mycorhisés avec les plants témoin.

5.4.4 La conductance stomatique (Gs)

L'évolution de la conductance stomatique (Gs) est similaire à celle de la photosynthèse nette. En effet, on observe une évolution croissante de cette variable jusqu'au 71^{ème} JAS (Figure 5.3).

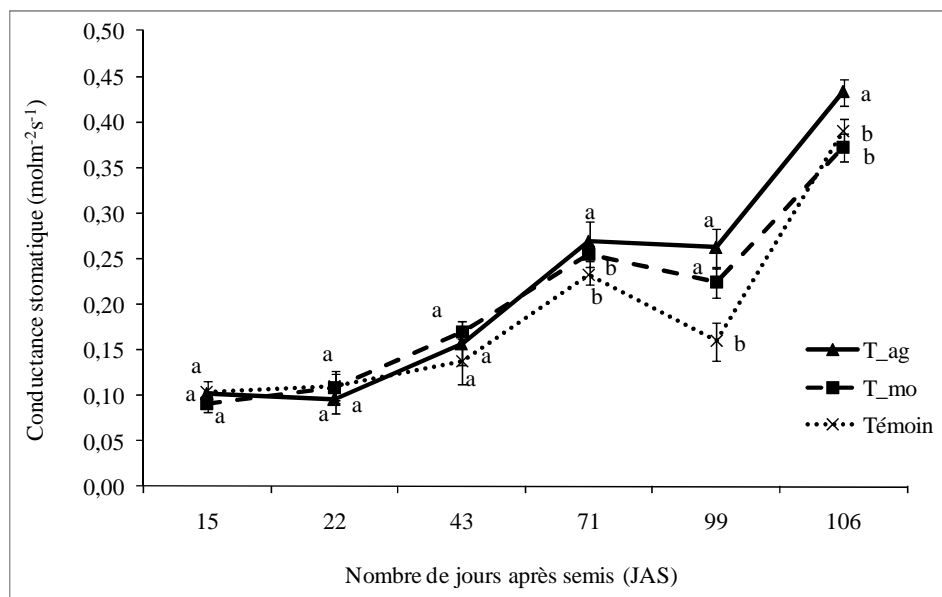


Figure 5.3 : Conductance stomatique moyenne des plants inoculés à *G. aggregatum* (T_ag), *G. mosseae* (T_mo) et le témoin. Les barres verticales représentent les écarts-types.

L'effet du déficit hydrique (période allant du 71^{ème} au 84^{ème} JAS) s'est manifesté par une chute légère de la conductance stomatique des plants inoculés et de manière significative ($P < 0,05$) chez les plants témoin (Figure 5.3). A la réhydratation (84^{ème} JAS), les plantes inoculées au *G. aggregatum* présentent une conductance stomatique plus élevée ($0,43 \text{ molm}^{-2}\text{s}^{-1}$) que celle des plantes inoculées à *G. mosseae* et les plantes témoins. Le statut ouvert des stomates (comme le montre la conductance stomatique) malgré la contrainte hydrique prolongée s'explique par le fait que les feuilles des plants inoculés ont transpiré sans limitation majeure et que l'eau perdue (lors de la transpiration) a été compensée par celle absorbée par le système racinaire (alimentation hydrique) du fait de l'association mycorhizienne.

5.4.5 L'efficacité d'utilisation de l'eau instantanée (EUEi)

L'efficacité d'utilisation de l'eau instantanée (EUEi) correspond au rapport de la quantité de carbone fixée dans la biomasse sur la quantité d'eau transpirée par la plante pour une période de temps donnée (Roussel, 2008). Son évolution au cours de cette expérimentation a été similaire aux autres paramètres éco-physiologiques (Pn et Gs). Cependant, on constate que l'application du stress a induit une chute assez marquée (de 2,95 à 1,52 $\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ pour les plants mycorhisés et de 2,17 à 0,45 $\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ pour les plants témoin) de cette variable (Figure 5.4).

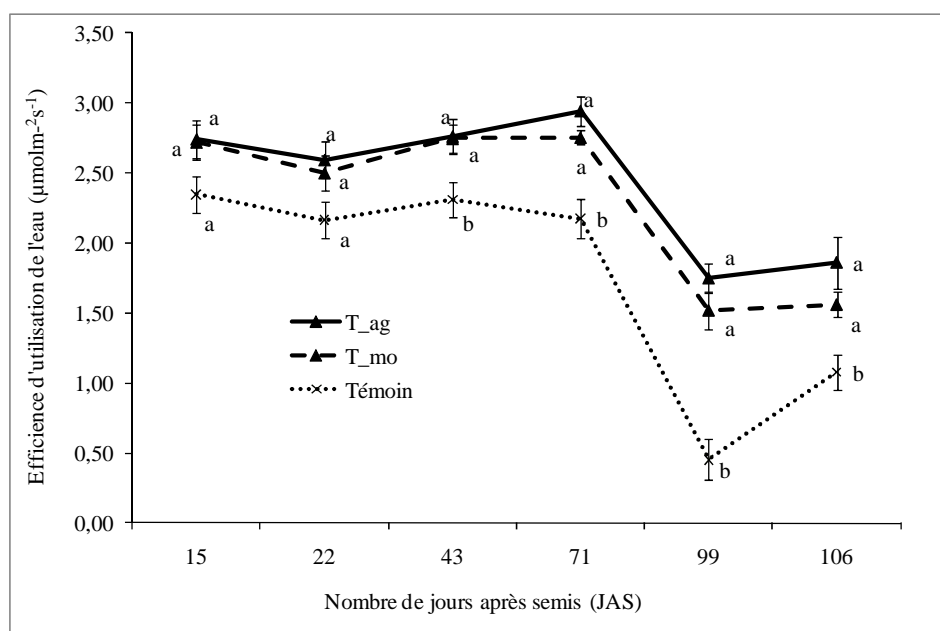


Figure 5.4: Efficacité d'utilisation de l'eau instantanée moyenne des plants inoculés à *G. aggregatum* (T_ag), *G. mosseae* (T_mo) et le témoin. Les barres verticales représentent les écart-types.

Dès le 43^{ème} JAS, qui correspond aux 34^{ème} jours après inoculation des plants aux *Glomus aggregatum* et *G. mosseae*, on note une EUEi des plantes inoculées significativement ($P < 0,05$) supérieure à celle des plantes témoins (Figure 5.4). A la réhydratation (84^{ème} JAS), cette même différence statistique reste significative. On déduit de ces résultats que le stress hydrique aurait une influence sur l'EUEi. Aucune différence statistique

n'a cependant été observée entre les plants inoculés. Ceci permet d'étayer l'hypothèse selon laquelle le tamarinier aurait un large spectre d'association mycorrhizienne (El-Siddig, 2006 ; Bourou *et al.*, 2010).

5.5 Discussion

La présente étude montre clairement que (i) la croissance du tamarinier est améliorée par la présence du champignon mycorrhizien du genre *Glomus* ; (ii) l'association mycorrhizienne a contribué à l'amélioration de la capacité de résistance à la sécheresse du tamarinier.

Ces résultats sont conformes à d'autres études (Castillo *et al.*, 2011 ; Shamshiri *et al.*, 2011 ; Arafat et Abdel, 2011) ; dans lesquelles il a été démontré que l'inoculation mycorrhizienne peut aider à améliorer la croissance et la résistance à la sécheresse des plantes. En effet, nous avons pu constater dans notre étude que l'application d'un stress hydrique a réduit la croissance et l'activité photosynthétique des plants témoin par rapport aux plantes mycorrhisées. Ceci pourrait s'expliquer par le fait que l'application du stress hydrique induirait dans les racines la synthèse d'acide abscissique qui va provoquer la fermeture des stomates et réduire la photosynthèse (Ruiz-Lozano *et al.*, 1995 ; Guissou *et al.*, 2001).

L'effet bénéfique des champignons mycorrhiziens arbusculaires sur le développement de plantes forestières a été largement démontré (Ba *et al.*, 2001 ; Guissou *et al.*, 2001 ; Bouamri *et al.*, 2006 ; Uhlmann *et al.*, 2006 ; El-Siddig *et al.*, 2006 ; Wang *et al.*, 2008 ; Leye *et al.*, 2009). Des études menées sur le *Jatropha curcas* L. récemment (2009) ont montré des résultats favorables à un accroissement des paramètres agromorphologiques (hauteur, biomasse, diamètre du collet et insertion foliaire) (Leye *et al.*, 2009 ; Maes *et al.*, 2009 ; Ashwani *et al.*, 2010). Ces résultats corroborent ceux trouvés sur d'autres espèces sahéliennes (*Bauhinia rufescens*, *Prosopis chilensis*, *Acacia nilotica*, *Prosopis juliflora* et *Acacia raddiana*). En effet l'inoculation mycorrhizienne a amélioré le développement des plants et ceci du fait de l'absorption l'eau et des éléments minéraux essentiels par les racines mycorrhisées.

Les résultats des études menées sur les espèces fruitières ligneuses tropicales telles que (*Balanites aegyptica*, *Parkia biglobosa* et *Ziziphus mauritiana*) montrent que les arbres fruitiers tropicaux répondent différemment à la mycorhisation avec *G. aggregatum*. *B. aegyptiaca* apparaît comme l'arbre fruitier le moins dépendant des mycorhizes et *Z. mauritiana* est celui qui répond le plus à la mycorhization. La littérature (El-Siddig *et al.*,

2006 ; Diallo *et al.*, 2008) situe *T. indica* à un niveau intermédiaire de dépendance mycorhizienne notamment en régime de stress hydrique.

L'importance du taux de mycorhization avec *G. aggregatum* (le genre *Glomus* est le plus abondant en zone tropicale aride) (Echairsi *et al.*, 2008 ; Ashwani *et al.*, 2010) ne préjuge pas de son efficacité sur la croissance des arbres fruitiers. En effet, *P. biglobosa* et *T. indica* répondent de façon moins marquée à l'inoculation alors qu'ils ont des taux de mycorhisation comparables à celui de *Z. mauritiana* (Guissou *et al.*, 2001). Il est en revanche difficile de remarquer que l'application de la contrainte hydrique n'affecte pas très souvent le taux de mycorhisation des arbres fruitiers. Certains auteurs ont montré (Rambal *et al.*, 2003 ; Uhlmann *et al.*, 2006) que le stress hydrique réduit le taux de mycorhisation, ce qui ne corrobore pas les résultats de la présente étude.

L'amélioration de l'EUEi des plantes inoculées, pour le cas de notre étude, s'oppose aux résultats obtenus par Guissou *et al.* (2001) et d'autres auteurs (Ashwani *et al.* (2010) et Leye *et al.* (2009) sur jatropha et Arafat et Abdel (2011) sur *Capsicum annum*), qui montrent que les effets du stress hydrique sur l'EUEi pourraient varier avec l'espèce de champignon mycorhizien, la plante hôte, l'intensité du stress hydrique et la durée d'exposition des plants au stress hydrique.

L'effet d'une mycorhization contrôlée sur la croissance de jeunes plants d'arganier par exemple issus de semis de graines a été évalué par une souche de *Glomus intraradices* et a montré un effet bénéfique sur les paramètres de croissance (Echairsi *et al.*, 2008). Seulement la durée de l'expérimentation en serre semble être importante pour mieux mettre en évidence les effets de l'inoculation mycorhizienne sur les paramètres agromorphologiques (Ruiz-Lozano *et al.*, 1995 ; Sylvia *et al.*, 1993 ; Bouamri *et al.*, 2006). Neuf mois d'expérimentation sur les plants d'arganier, et 12 mois pour les espèces sahéliennes tropicales sont recommandés. En effet à 4 mois (pour le cas de notre étude), l'effet de l'inoculation tend à s'estomper avec le temps mais resterait significatif après 12 mois (Fernando *et al.*, 2010 ; Leye *et al.*, 2009).

La réaction des plants observés pour la conductance stomatique a été celle d'une caractéristique de mécanisme de résistance (la tolérance) au déficit hydrique (Sperry, 2000 ; Rambal *et al.*, 2003). Cette conductance stomatique diminue lorsque la contrainte hydrique augmente. Sperry (2000) a montré que la conductance stomatique était souvent corrélée positivement à la conductance hydraulique. Ainsi, nous pensons que la chute de la conductance stomatique due à la sécheresse provoque une diminution de la conductance hydraulique. Notons qu'il a été également démontré que la conductance stomatique diminue de

manière linéaire avec l'abaissement du potentiel hydrique (Echairi *et al.*, 2008 ; Fernando *et al.*, 2010). Cette observation confirme nos résultats sur l'efficacité de l'utilisation de l'eau des plantes inoculées et des plants témoin.

Une étude menée chez quatre arbres fruitiers (*Z. mauritiana*, *P. biglobosa*, *B. aegyptiaca* et *T. indica*) a montré que la dépendance vis-à-vis du champignon mycorhizien, *G. aggregatum* a augmenté significativement la nutrition en N, P K et Mg, et ce, quel que soit le régime hydrique. Pourtant le régime de stress hydrique a en général, tendance à diminuer les concentrations en N, P, K et Mg des arbres fruitiers mycorhisés ou non. Ces résultats sont similaires à ceux trouvés sur les espèces annuelles (Lambers et Brundrett, 2011 ; Arafat et Abdel, 2011). Toutefois cet aspect du diagnostic de la nutrition minérale en condition de déficit hydrique du tamarinier n'a pas été abordé par cette présente étude

Notons que le phénomène le plus important de la régulation de cette réponse au stress hydrique des plantes est la fermeture des stomates des plantes (Rambal *et al.*, 2003). L'amplitude de cette réaction est typique à l'espèce et aux conditions environnementales. Des études passées (Vasquez *et al.*, 1990 ; Guissou *et al.*, 2001 ; Rambal *et al.*, 2003) ont montré que, la fermeture stomatique complète des feuilles du fait de la contrainte hydrique pour les plantes annuelles cultivées (*Vigna* et *Phaseolus*) dans un volume de sol réduit intervient après quelques jours (6). La vitesse de réponse des stomates au cours du temps dépend non seulement des espèces et de leur consommation en eau (mis en évidence par le bilan hydrique) mais aussi de la réserve en eau utilisable présente dans le sol (niveau de l'efficacité d'utilisation de l'eau instantanée) (Pang *et al.*, 2011 ; Rodriguez-Gamir *et al.*, 2011). L'association mycorhizienne contribue à l'amélioration de l'alimentation hydrique et minérale des plantes hôtes (Echairi *et al.*, 2008 ; Fernando *et al.*, 2010). Il a été souvent observé qu'une fermeture stomatique plus lente (14 jours pour cette étude) peut traduire une certaine tolérance à la déshydratation qui peut être accompagnée d'un ajustement osmotique (Rambal *et al.*, 2003 ; Pang *et al.*, 2011 ; Rodriguez-Gamir *et al.*, 2011).

En conclusion, nos résultats indiquent que l'inoculation avec *G. aggregatum* et *G. mosseae* stimule la croissance et la capacité de résistance au stress hydrique du tamarinier. Cela s'est traduit par l'accroissement de la taille et du diamètre au collet (paramètres morphologiques) et de l'efficacité de l'utilisation de l'eau instantanée par rapport aux plants témoin. Toutefois, cette étude ne révèle pas une différence significative de la réponse à l'inoculation mycorhizienne entre les différentes provenances/écotypes de tamarinier. Une étude sur la variabilité de la réponse à la tolérance au stress hydrique est à envisager avec différentes souches ou

espèces de champignons mycorhiziens et sur une collection plus importante de tamariniers en utilisant d'autres critères physiologiques/biochimiques d'évaluation tels que la teneur en proline, en ABA (acide abscissique), ascorbate peroxydase (APX) et/ou le superoxyde dismutase (SOD) (Echairi *et al.*, 2008 ; Fernando *et al.*, 2010 ; Leye *et al.*, 2009 ; Pang *et al.*, 2011 ; Rodriguez-Gamir *et al.*, 2011). Cette approche pourra mieux élucider les mécanismes impliqués dans la réponse à l'inoculation mycorhizienne du tamarinier mais aussi révéler ceux qui entrent aussitôt dans la résistance de la plante au stress hydrique à l'état juvénile de la plante.

Chapitre 6

**Etude éco-physiologique du tamarinier
(*Tamarindus indica* L.) dans deux
zones agro-écologiques contrastées du
Sénégal.**

6.1 Introduction

Le déficit hydrique est considéré par plusieurs auteurs comme étant le facteur le plus limitant pour la production agricole en zone sub-tropicale (Kizito *et al.*, 2006 ; Porcel et Ruiz-Lozano, 2004 ; Bader *et al.*, 2006 ; Logan *et al.*, 2010 ; Rodriguez-Gamir *et al.*, 2011 ; Conedera *et al.*, 2011). Au Sahel, le problème de la sécheresse est surtout lié à la baisse et à la variabilité spatio-temporelle des précipitations (Moiwo *et al.*, 2011). Les conséquences observées sur la production agricole sont de plusieurs ordres dont la baisse et/ou la fluctuation des rendements des cultures annuelles. Par ailleurs, la sécheresse affecte aussi l'environnement (dégradation des espaces pastoraux et disparition progressive des ligneux) à tel point que les besoins en aliments des animaux ne sont que rarement satisfaits (Van Horn, 2002 ; Stokes *et al.*, 2011 ; Lambers *et al.*, 2011a ; Lambers *et al.*, 2011b). Si les effets de la sécheresse sur les cultures annuelles semblent être connus, peu d'études ont fait le constat sur la dégradation des ligneux en terme de leur production et fonctionnement surtout au Sahel (Lufafa *et al.*, 2008). Divers auteurs (Gao *et al.*, 2009 ; Moiwo *et al.*, 2011 ; Stokes *et al.*, 2011) ont attribué le phénomène de la dégradation des parcours aux effets répétés de la sécheresse.

Face à la recrudescence des famines, il apparaît nécessaire de promouvoir la diversification agricole comme alternatif aux systèmes de production agricoles préexistants qui sont souvent de type monoculturel. L'intégration d'espèces ligneuses à usages multiples dans le système de production agricole actuel passe par une meilleure connaissance du matériel végétal et de son comportement vis-à-vis des plantes annuelles. Cette connaissance pourrait être mise en évidence par la caractérisation de son fonctionnement hydrique. La caractérisation du fonctionnement hydrique des plantes a été longuement abordée sur les plantes telles que le *Vigna unguiculata*, *Zea mays*, *Arachis hypogaea*, etc. (Davies *et al.*, 1993 ; Falalou, 2006 ; Dramé, 2005 ; Deblonde et Ledent, 2000 ; Moiwo *et al.*, 2011).

Sur des ligneux, seules quelques études isolées (sur *Acacia*, et les *combretaceae*) existent dans la zone tropicale au sud du Sahara. On peut noter les travaux effectués sur des espèces forestières sahéliennes, *Acacia tortilis* (Diouf, 1996), *Combretum glutinosum*, *Guiera senegalensis* ; *Piliostigma reticulatum* ; *Balanites aegyptica*, *Boscia senegalensis*, *A. senegal* et *Ziziphus mauritiana* (Fournier, 1995 ; Kizito *et al.*, 2006 ; Lufafa *et al.*, 2008).

Le rôle des espèces fruitières comme *Adansonia digitata* ou *Tamarindus indica* dans l'amélioration de revenus des ruraux a été prouvé par De Caluwé *et al.* (2010) et Buchmann *et al.* (2010). En effet, le tamarinier (Fabacées) est une plante à usages multiples. Les feuilles et les écorces sont utilisées dans la pharmacopée, les fruits consommés comme acidulant et les graines dans l'alimentation animale, entre autres (Morton, 1987 ; Diallo, 2001 ; El-Siddig *et al.*, 2006 ; Bowe, 2007) (voir chapitre 1).

La caractérisation du fonctionnement hydrique des plantes est un outil pour la sélection des plantes et/ou variétés pour leur tolérance au déficit hydrique (Lufafa *et al.*, 2008 ; Zhu Qian *et al.*, 2011 ; Logan *et al.*, 2010). Elle est le plus souvent effectuée au jeune âge pour des raisons de facilité (pépinière et en début

d'installation au champ des plants). Pourtant, même adulte, les ligneux restent tributaires des facteurs climatiques tels que la pluviométrie (Kisito *et al.*, 2007 ; Lufafa *et al.*, 2008). Il apparaît donc important de comprendre le fonctionnement hydrique *in situ* de plants adultes pour mieux expliquer les effets dépressifs d'un stress hydrique si complexe au jeune âge. Toutefois, le comportement des plantes *in situ* est influencé par les conditions climatiques et l'uniformité (âge) des sujets (pieds de tamarinier) à suivre.

Le présent travail a été effectué sur des sujets adultes de *T. indica*, *in situ* au Sénégal (Niokhoul en zone sahélienne et Mbassiset en zone soudano-sahélienne) et vise principalement à : (1) comprendre et décrire les stratégies physiologiques de gestion de l'eau du tamarinier en conditions arides ; et (2) comprendre l'incidence de cette stratégie de gestion de l'eau sur la phénologie et la productivité.

6.2 Méthodologie

L'étude a été menée au Sénégal, caractérisé par un climat sec et aride. Elle a adopté une approche de terrain (Seghieri, 2010 ; Conedera *et al.*, 2010) basée sur des peuplements adultes et des données climatiques collectées sur les sites de l'étude.

6.2.1 Données climatiques

Le Sénégal est composé de trois zones agro-écologiques (sahélienne, soudano-sahélienne et soudanienne) (Sarr *et al.*, 2005) (voir chapitre 1). Deux sites de peuplement ont été choisis respectivement dans la zone agro-écologique sahélienne (Niokhoul, limite nord du peuplement du tamarinier au Sénégal) et dans la zone soudano-sahélienne (Mbassis) qui se situe dans le bassin arachidier sénégalais. Ce choix des sites a été fait sur la base de l'importance du peuplement de tamariniers observé dans la zone soudano-sahélienne (Mbassis) et du caractère relique (limite du peuplement du tamarinier) du peuplement de la zone de Niokhoul.

Pour chaque site, une station météorologique automatique de marque *HOBO weather station*, modèle H21-002 (Photo 6.1) a été installée pour la mesure continue et journalière des paramètres climatiques suivants : la température de l'air, la pression atmosphérique, l'humidité relative, la vitesse du vent, la pluviométrie et la radiation globale. Les stations météorologiques avaient été préalablement calibrées au CERAAS de Thiès (Sénégal).

6.2.2 Les caractéristiques climatiques des deux sites d'étude

a)- Les précipitations

Les précipitations, le rayonnement global (défini comme étant la somme du rayonnement direct et du rayonnement diffus), et les vents sont parmi les principaux facteurs qui caractérisent le climat (Kizito *et al.*, 2006). Leur importance sur le fonctionnement hydrique des espèces végétales a été signalée par plusieurs auteurs (Grouzis et Akpo, 2006 ; Sarr *et al.*, 2005 ; Salack *et al.*, 2010). La pluviométrie théorique des sites

d'étude a été estimée entre 300 à 400 mm /an et 600 à 800 mm/an environ pour Niokhoul et Mbassis, respectivement (Figure 6.1).

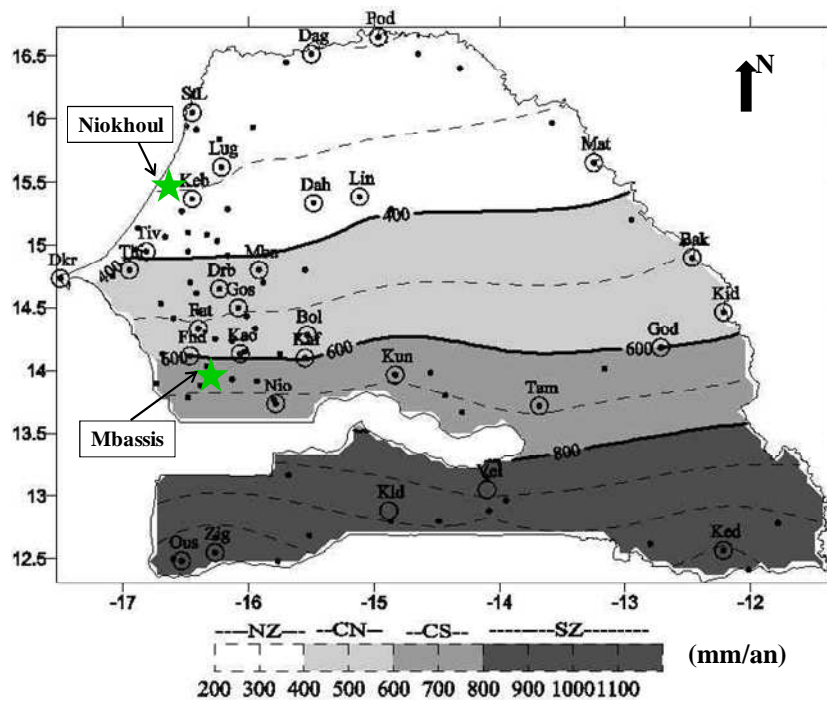


Figure 6.1: Carte des isohyètes du Sénégal (Salack *et al.*, 2011).



Photo 6.1 : Collecte des données climatiques

b)- La température et saisons climatiques

Au niveau de la station, la température horaire de l'air a été suivie dans les deux sites de l'étude. En prenant en compte les paramètres du climat divers auteurs (Bader *et al.*, 2006 ; Thiam *et al.* 2011) distinguent trois grandes saisons climatiques au courant de l'année.

- ❖ une saison sèche froide (SSF) : octobre à février ;
- ❖ une saison sèche chaude (SSC) : mars à juin ; et
- ❖ une saison humide et chaude /saison des pluies (SHC) : juillet à septembre.

Le suivi éco-physiologique des peuplements tel que recommandé par certains auteurs (Bader *et al.*, Kisito *et al.*, 2007 ; Lufafa *et al.*, 2008) dans la zone Ouest africaine a été effectué sur la base de ces saisons climatiques. Ces dernières intègrent la variation saisonnière des principales variables climatiques de la zone notamment, la pluviométrie, la température, l'humidité relative de l'air, et la radiation globale (Salack *et al.*, 2010 ; Schmidt *et al.*, 2011 ; Mohino *et al.*, 2011 ; Thiam *et al.*, 2011). En outre il a été démontré une variabilité phénologique des espèces végétales ligneuses de la zone en fonction des saisons climatiques (Kouyaté, 2005 ; Kisito *et al.*, 2006 ; Diallo *et al.*, 2007).

6.2.3 Echantillonnage des arbres dans les sites d'étude

Pour chacun des deux sites, 70 arbres ont été choisis de manière aléatoire. Pour chaque individu, la circonférence à 1,3 m (considéré ici comme le diamètre à hauteur de poitrine à 1,3 m, Dhp) a été mesuré à l'aide d'un ruban mètre gradué. La structure de peuplement (distribution des individus en classe de Dhp) a été effectuée en se basant sur la règle de Yule (Grouzis et Akpo, 2006) qui stipule que :

$$K = 2,5 \sqrt[4]{n} \quad (6.1) ;$$

où n = taille de l'échantillon, et K = nombre de classes.

L'intervalle entre chaque classe a été obtenu de la manière suivante :

$$A = \frac{X_{\max} - X_{\min}}{K} \quad (6.2) ;$$

avec X max et X min, respectivement la plus grande et la plus petite valeur de X dans la série statistique, et A = l'intervalle des classes.

Trois sujets ont été choisis par site sur la base de la mesure du diamètre des arbres à la hauteur (1,3 m) de poitrine (Dhp), et sur le fait également que ces arbres doivent avoir un même port, être du point de vue phénologique similaire et situés sur une même toposéquence. Ce choix est fait en s'appuyant sur l'hypothèse suivant laquelle les arbres ayant un Dhp ($\pm 0,5$ cm), une phénologie et un port similaires auraient le même âge (Fournier, 1995 ; Sillett *et al.*, 2010 ; Zhu Qiuhan *et al.*, 2011). La distribution des individus en classe de diamètre indique que 25% des arbres (la médiane) appartient à la classe comprise entre 1,93 - 2,38 m (Figure 6.2). De ce fait cette classe de médiane est retenue comme celle au sein de laquelle le choix de sujets devrait s'opérer (Lumbres *et al.* 2012a ; Lumbres *et al.*, 2012b ; Sop *et al.*, 2011).

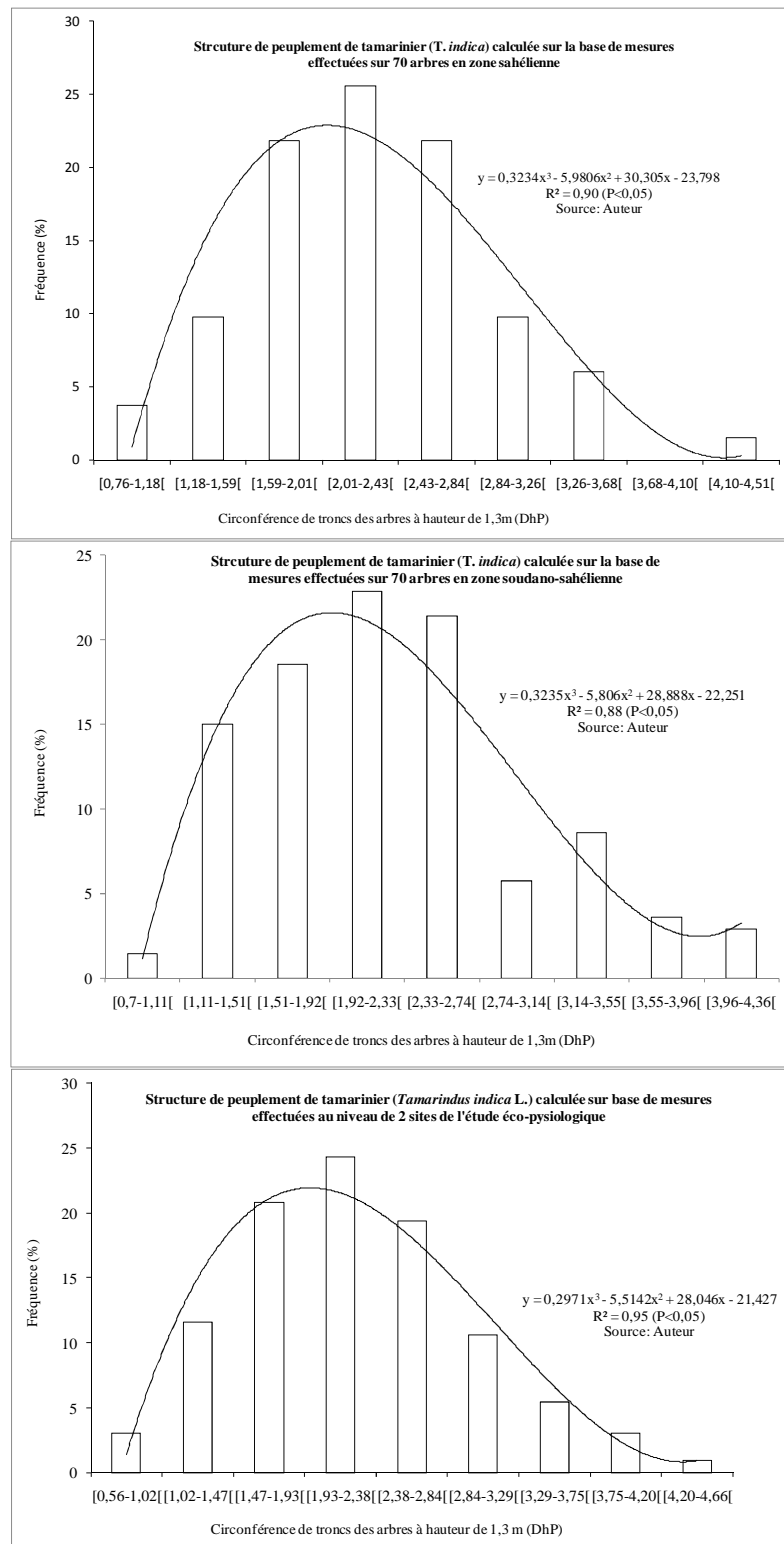


Figure 6.2: Structure des peuplements de tamarinier (*T. indica*) dans la zone sahélienne, soudano-sahélienne et la moyenne des deux zones agro-écologiques au Sénégal.

6.2.4 *Fréquence des mesures et observations des paramètres éco-physiologiques*

Les observations et mesures éco-physiologiques ont été faites à la moitié (15 du mois) de chaque mois pendant toute la campagne agricole 2009/2010 (1 an). Elles ont concerné les variables physiologiques qui expliquent au mieux le fonctionnement hydrique des plantes (Lufafa *et al.*, 2008 ; Seghieri, 2010 ; Rodriguez-Gamir *et al.*, 2011). L'on peut citer : le potentiel hydrique foliaire, les échanges gazeux et la phénologie (feuillaison et fructification).

Le potentiel hydrique foliaire

Plusieurs méthodes existent pour mesurer l'une ou l'autre des composantes du potentiel de l'eau (Ψ_w) dans la plante. Ce potentiel Ψ_w est calculé comme suit : $\Psi_w = \Psi_s + \Psi_p$, où Ψ_s représente le potentiel osmotique et Ψ_p le potentiel hydrostatique ou la turgescence (Levitt, 1980 cité par Logan *et al.*, 2010). L'utilisation d'une chambre à pression (Scholander type PMS Instruments, Corvallis, modèle 1001) a permis de mesurer le potentiel hydrique sur un rameau feuillé.

Les mesures de ce potentiel hydrique ont été effectuées à une fréquence moyenne de 30 jours. Les mesures ont porté sur trois individus phénotypiquement équivalents (phénologie, âge, taille et port) dont le Dhp appartient à la classe de distribution de 1,93 à 2,38 m (Figure 6.2). A chacune des mesures, les échantillons (rameaux feuillés) ont été choisis parmi ceux qui sont situés à une même hauteur de la couronne et ceci sur les quatre côtés cardinaux (nord, sud, est et ouest) de chaque spécimen suivi, suivant la méthode proposée par Grouzis et Akpo (2006) et Fournier (1995). Ces échantillons devaient être d'apparence saine, de même stade phénologique et présentant un minimum de variabilité morphologique entre eux.

Une fois le rameau feuillé sectionné, il était aussitôt introduit dans la chambre hermétique de la bombe à pression en laissant dépasser son extrémité sectionnée pour la mesure (Figure 6.3). A l'aide d'une réserve d'air comprimé, on applique une pression dans la chambre.

En observant l'extrémité sectionnée du rameau feuillé à travers une loupe, on détermine à l'aide d'un manomètre, la tension pour laquelle le ménisque de la sève apparaît sur la surface de coupe. Cette mesure correspond au potentiel hydrique foliaire *in situ* exprimé en MPa.

Le schéma descriptif du principe de fonctionnement de la chambre à pression est donné à la figure 6.3.

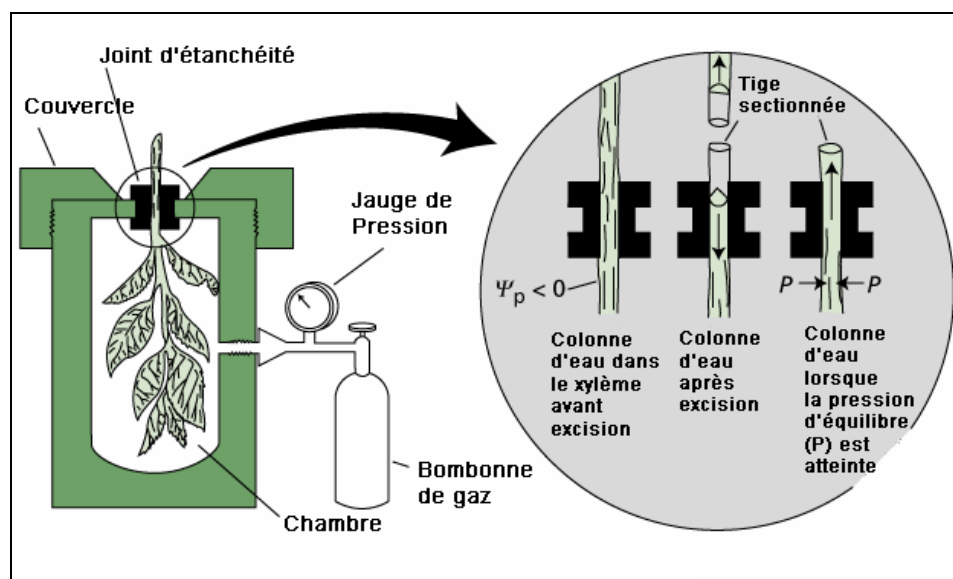


Figure 6.3: Schéma de fonctionnement d'une chambre à pression type PMS (Grouzis et Akpo, 2006)

La cinétique journalière c'est-à-dire la fluctuation du potentiel sur une journée du potentiel hydrique foliaire a été mesurée en janvier (pour la saison sèche froide), en mai (pour la saison sèche chaude) et en août (pour la saison humide chaude) au niveau des deux sites (Niokhoul et Mbassis). L'hypothèse énoncée était que le temps de récupération physiologique de la plante serait fonction de la saison climatique. Les mesures commençaient avec celle du potentiel hydrique de base (Ψ_{bs}) (Seghieri *et al.*, 2010 ; Logan *et al.*, 2010), mesuré à 4 h du matin (avant la levée du soleil). Ce paramètre est considéré comme un indicateur du niveau de contrainte hydrique à laquelle est soumise la plante en début de journée (Logan *et al.*, 2010). Ce potentiel hydrique foliaire de base correspond au potentiel d'équilibre entre la rhizosphère et la plante (Logan *et al.*, 2010) quand le flux d'eau du sol aux racines est nul (ce qui est le cas avant la levée du soleil).

Cette mesure du potentiel hydrique de base est suivie des mesures répétées chaque 2 h, jusqu'à 24 h (minuit) en temps universel. Au cours de la journée, on atteint une valeur maximale, appelée potentiel hydrique minimum (Ψ_{min}) (maximum en valeur absolue), qui représente la contrainte hydrique interne maximale journalière résultant du bilan entre la transpiration et l'absorption d'eau (Aussenac *et al.*, 1984 ; Kasraoui *et al.*, 2005 ; Seghieri *et al.*, 2010). Le potentiel hydrique de récupération (Ψ_{rec}) est observé à 22 h (Kasraoui *et al.*, 2005 ; Logan *et al.*, 2010). Il représente le potentiel hydrique de la plante lorsqu'il n'y a plus de pertes en eau (ou qu'elles sont négligeables) et lorsque la plante récupère en partie ou entièrement l'eau perdue au cours de la journée (Aussenac *et al.*, 1984 ; Seghieri *et al.*, 2010). C'est d'ailleurs un indice à la fois de la capacité et de la vitesse d'une plante à rétablir son équilibre hydrique avec le sol et l'atmosphère. Pour certains auteurs (Kasraoui *et al.*, 2005 ; Maes *et al.*, 2009 ; Seghieri, 2010), ce potentiel hydrique de récupération est le paramètre le plus discriminant pour tester l'évolution de la contrainte hydrique édaphique.

Ainsi, la capacité de récupération hydrique d'une plante est une caractéristique importante et est liée à l'espèce et là-dedans la variété. Sa vitesse serait en effet liée aux caractéristiques génétiques de l'espèce/variété (Kasraoui *et al.*, 2005). L'indice de la vitesse de récupération (G_t) est défini à partir de la tension de récupération (Maes *et al.*, 2009) par la formule :

$$G_t = \frac{\Psi_{\text{réc}} - \Psi_{\text{min}}}{\Psi_{\text{bs}} - \Psi_{\text{min}}} \quad (6.3);$$

avec : $\Psi_{\text{réc}}$ = potentiel hydrique de récupération ; Ψ_{bs} = potentiel hydrique de base ; Ψ_{min} = potentiel hydrique minimum.

L'intensité du flux de transpiration de la plante, appelée delta (δ), est un indice qui intègre la transpiration (Maes *et al.*, 2009) et la conductivité hydraulique du système sol-plante (Fournier, 1995). Il peut être déterminé par la formule :

$$\text{Delta } (\delta) = \Psi_{\text{bs}} - \Psi_{\text{min}} \quad (6.4);$$

Il permet de déterminer de façon indirecte l'intensité du flux transpiratoire de la plante.

Les échanges gazeux

Les échanges gazeux permettent de se renseigner sur l'état hydrique de la plante. Ils regroupent une cohorte de variables calculées ou mesurées après une lecture directe d'un nombre de paramètres (la photosynthèse nette, la transpiration, la conductance stomatique et/ou le rayonnement photosynthétiquement actif (PAR)). Ces variables sont pour la plupart des paramètres fondamentaux du fonctionnement éco-physiologique des végétaux (Annerose, 1990 ; Falalou, 2006 ; Rouhi *et al.*, 2007 ; Maes *et al.*, 2009). L'appareil de mesure utilisé ici était l'analyseur de CO₂ LCi (ADC BioScientific Ltd, modèle EN110DB). Il opère sur la base d'un système à circuit ouvert, la chambre de mesure est alimentée en permanence par de l'air prélevé à 4 m de distance du sol à l'aide d'une canne du type IRGA modèle LCi. On mesure en continu les différences de concentration en CO₂ et H₂O entre l'entrée et la sortie de l'enceinte de la chambre dans laquelle la feuille est enfermée. Les teneurs en CO₂ et en vapeur d'eau ont été mesurées par des analyseurs infrarouges (LCA). De même un capteur d'humidité et un quantum-mètre sont associés à la chambre (PLC), permettant respectivement la mesure de l'humidité relative de la chambre et du rayonnement photosynthétiquement actif (PAR). Cinq (5) feuilles saines et entièrement développées ont été échantillonnées sur chaque côté cardinal (nord, est, ouest et sud) de l'arbre. La cinétique journalière (chaque 2 heures) a été suivie chaque mois et les résultats ont été représentés par des moyennes saisonnières (SSF : saison sèche froide, SSC : saison sèche chaude et SHC : saison humide et chaude). L'efficacité d'utilisation de l'eau instantanée (EUE_i) exprimée en $\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ a été calculée par la formule de Jones (1993) cité par Roussel (2008), qui stipule que :

$$\text{EUE}_i = A/E \quad (6.5);$$

où A = photosynthèse nette, E = transpiration ou évaporation, Y = rendement et B = biomasse.

En effet, $EUEi$ ($\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$) représente le rapport entre le flux de CO_2 entrant dans la feuille et le flux de vapeur d'eau sortant de la feuille pendant la photosynthèse (Rouhi *et al.*, 2007 ; Roussel, 2008).

6.2.5 Etat hydrique du sol

L'évaluation du potentiel hydrique du sol permet une évaluation de l'état de l'eau du sol. La méthode neutronique a été retenue pour déterminer l'humidité du sol en raison de sa rapidité de mise en œuvre, de sa fiabilité et de la possibilité du suivi de l'humidité *in situ* et continu dans le temps (Roussel, 2008 ; Logan *et al.*, 2010). Douze tubes d'accès de sonde en PVC ont été installés autour de chaque arbre (3 arbres/site) choisi pour les mesures de l'humidité volumique du sol. La mesure a été effectuée sur les quatre côtés cardinaux (nord, sud, est et ouest) avec trois répétitions pour un même côté à 1 m et 3 m du tronc et un hors de la frondaison du houppier (Moiwo *et al.*, 2011), à une profondeur de 6 m.

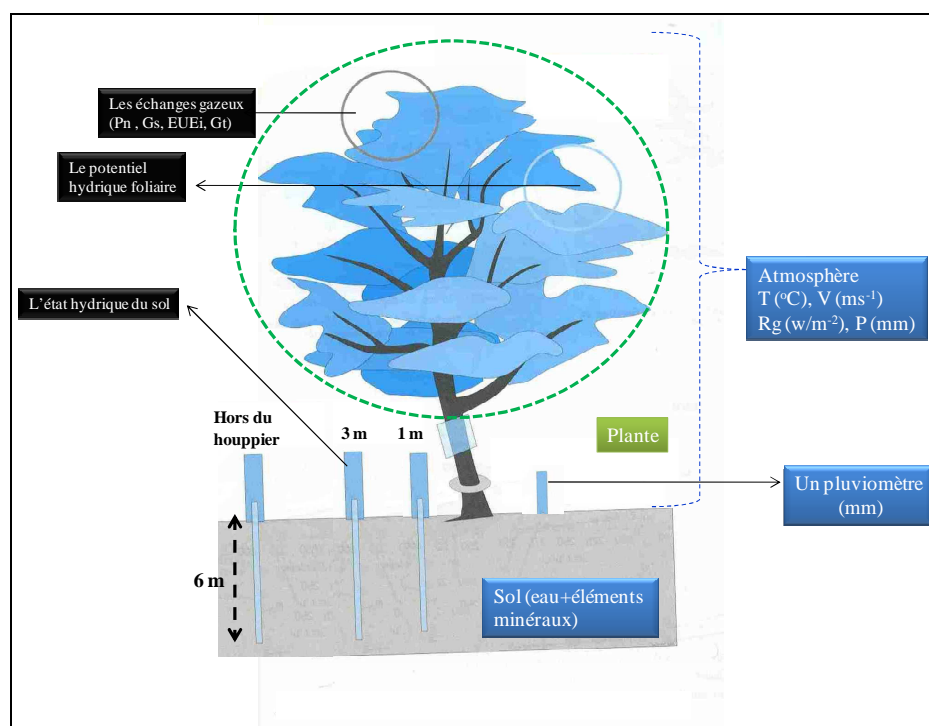


Figure 6.4 : Dispositif de suivi éco-physiologique.

P_n (photosynthèse nette); G_s (Conductance stomatique); $EUEi$ (Efficacité d'Utilisation de l'Eau instantanée); G_t (Gain de tension); T (Température); R_g (Rayonnement globale); P (Pluviométrie); V (Vitesse du vent).

Les mesures ont été effectuées sur l'horizon 0-100 cm tous les 10 cm et puis chaque 20 cm pour le reste du profil c'est-à-dire jusqu'à 6 m (Moiwo *et al.*, 2011). Les mesures ont été effectuées tous les mois au cours de la campagne agricole 2009/2010. L'utilisation de la sonde à neutron type Solo 25, modèle T7 doit être précédée d'un étalonnage. Cet étalonnage s'impose du fait qu'il existe dans le sol des atomes d'hydrogène

autres (matière organique, argiles) que ceux des molécules d'eau (Granier et Colin, 1990). D'autre part, le sol peut renfermer des éléments chimiques capables d'absorber les neutrons (chlore, bore).

Nous avons utilisé la méthode gravimétrique (Moiwo *et al.*, 2011), qui consiste à faire, lors de l'installation des tubes d'accès sonde, des prélèvements gravimétriques d'échantillons de sol à la tarière type Edelman, modèle 022308 et des comptages neutroniques *in situ*. Ces mesures gravimétriques et neutroniques ont été réalisées sur tous les tubes lors de leur mise en place, tous les 10 cm de la surface jusqu'à 100 cm et puis tous les 20 cm, de 100 cm jusqu'à 600 cm. Ces couples de prélèvements gravimétriques/impulsions de sonde ont aussi été obtenus pour d'autres dates (23 avril 2009 et 27 août 2009) de mesure correspondant à des degrés d'humectation très variés (points secs et points humides) du sol. Après chaque série de prélèvements, on passe à la détermination de l'humidité pondérale (Hp) (définie comme la valeur massique de l'eau contenue dans un échantillon de sol) (Moiwo *et al.*, 2011) des échantillons de sol obtenus lors des prélèvements *in situ*. Le poids frais des échantillons a été obtenu par pesée à l'aide d'une balance de précision électronique ($\pm 0,01$ g) marque Mettler, modèle AIP419W. Ensuite, ils ont été mis à sécher dans une étuve (type Jouan, modèle EU170) à 105°C jusqu'à l'obtention d'un poids constant. L'humidité pondérale (Hp) a été obtenue par la formule :

$$H_p = \frac{PF - PS}{PS - Ta} \times 100 \quad (6.6) ;$$

avec PF = poids frais de l'échantillon de sol, PS = poids sec de l'échantillon de sol, et Ta = poids vide du contenant de l'échantillon.

La densité apparente du sol a été mesurée *in situ* par un densimètre (type gamma modèle 3430-M). L'humidité volumique (Hv) est calculée à partir de l'humidité pondérale (Hp) et de la densité apparente (Da), à l'aide de la formule (Granier et Colin, 1990 ; Moiwo *et al.*, 2011) :

$$H_v = H_p \times D_a \quad (6.7) ;$$

l'humidité volumique est exprimée en cm³ d'eau par cm³ de sol sec (cm³.cm⁻³).

Du fait de la dérive électronique pouvant entraîner des variations dans les valeurs du comptage neutronique, ces valeurs de comptage doivent être corrigées. Cette correction a été faite par l'établissement d'un ratio du comptage *in situ* (CN) sur le comptage dit de référence (CNe) réalisé dans un fût d'eau (appelé point eau), et que l'on a ramené au comptage d'une sonde qui donne 1000 impulsions par seconde dans de l'eau. Le comptage neutronique corrigé (CNC) s'exprime sous la forme :

$$CNC = \frac{CN}{CNe} \times 1000 \quad (6.8) ;$$

Une relation linéaire a ainsi été établie entre la série de couples de données Hv (cm³.cm⁻³) et CNC à l'aide d'une régression linéaire simple.

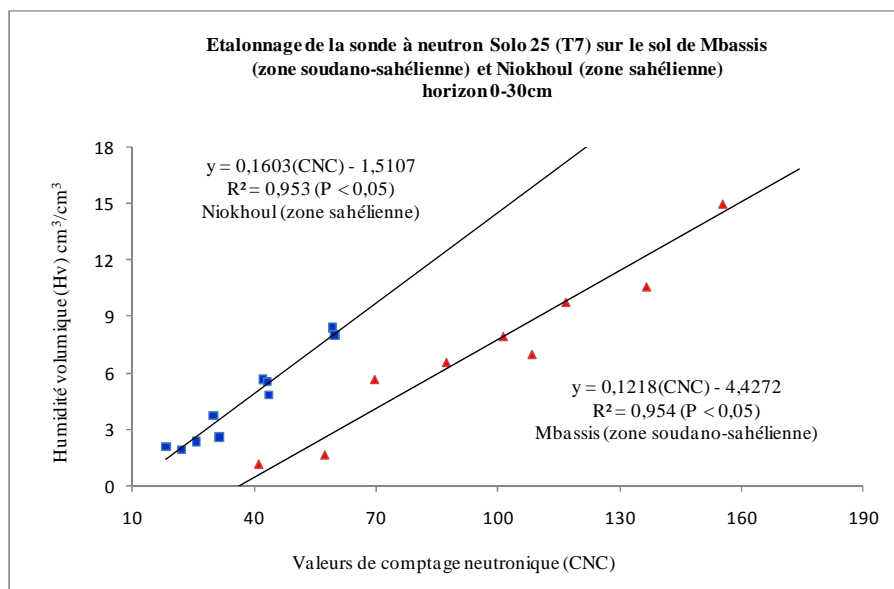


Figure 6.5 : Etalonnage de la sonde à neutrons Solo 25 (T7) sur les sols de Mbassis (zone soudano-sahélienne) et Niokhoul (zone sahélienne) au Sénégal horizon 0-30 cm.

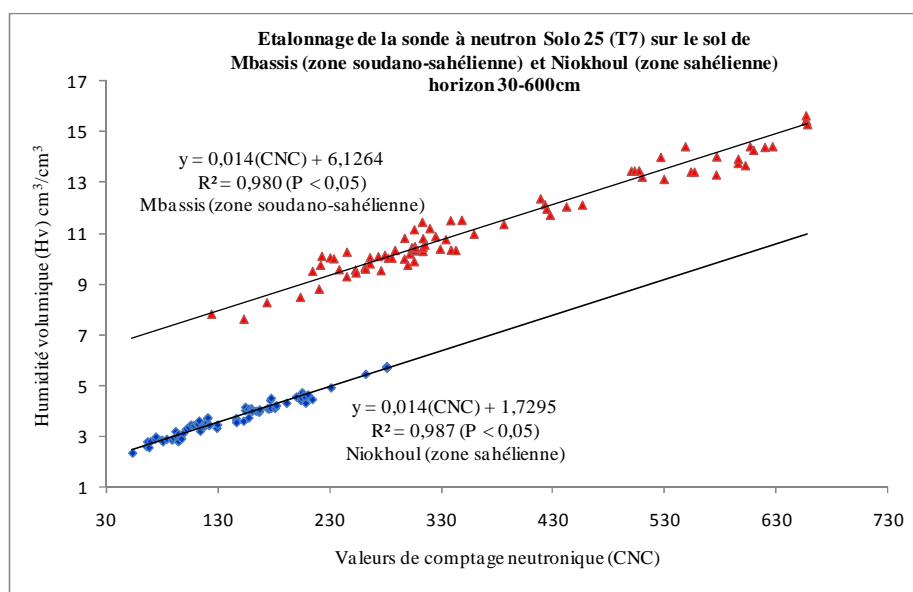


Figure 6.6 : Etalonnage de la sonde à neutrons Solo 25 (T7) sur les sols de Mbassis (zone soudano-sahélienne) et Niokhoul (zone sahélienne) au Sénégal horizon 30-600 cm.

Les mesures sondes corrigées (CNC) ont ainsi été converties en humidité volumique suivant l'équation de la relation linéaire de la forme (Moiwo *et al.*, 2011) :

$$H_v = a (\text{CNC}) + b \quad (6.9) ;$$

où a représente la pente de l'équation, et b la valeur constante caractéristique du type de sol.

Les mesures ont été faites avec une sonde à neutron de marque Troxler, type Solo 25, modèle T7, en option temps moyen avec un temps de comptage de 30 secondes. Le suivi hydrique a été fait à un pas de temps de mesure mensuel et les moyennes mensuelles du suivi saisonnier (SSF, SSC et SHC) ont été calculées. La série de données obtenues en fonction du temps a permis de déterminer les profils hydriques (Moiwo *et al.*, 2011).

6.2.6 Le bilan hydrique du sol

Le bilan hydrique d'un endroit exprime l'évolution, entre deux dates quelconques, de la masse d'eau présente dans le système sol-plante-atmosphère. Cette eau est répartie entre l'eau stockée dans le sol et la plante d'une part et les flux entrant et sortant de ces réserves d'autre part (Kizito *et al.*, 2006 ; Moiwo *et al.*, 2011). Le bilan hydrique apparaît comme un facteur déterminant pour comprendre le comportement hydrique des plantes en milieu naturel. Pour une période donnée, ce bilan peut s'écrire sous la formule suivante :

$$\Delta S = P + I - E - T - D - R + \Omega \quad (6.10) ;$$

où on a :

- ΔS : la variation du stock hydrique dans la couche du sol sous considération des autres paramètres de l'équation (6.10) ;
- P : précipitations reçues entre ces deux dates ;
- I : irrigation ;
- E : évaporation du sol ;
- T : transpiration des plantes ;
- D : drainage sous la zone du sol exploité vers la nappe phréatique ;
- R : pertes en eau par ruissellement de surface ; et
- Ω : remontée capillaire.

Dans cette relation, seuls E, D et R sont difficilement mesurables. Pour le cas du fonctionnement hydrique des ligneux, E, D et R sont négligeables (Lufafa *et al.*, 2008 ; Seghieri, 2010 ; Moiwo *et al.*, 2011 ; Carter et Nippert, 2012). Nous nous sommes affranchis de D en prospectant une tranche de sol de 0-200 cm au-delà de laquelle l'humidité ne varie pas ou très peu. Une telle situation nous fait supposer un drainage nul. En même temps, ce profil fait partie de la zone d'absorption d'eau du tamarinier dont la limite se situerait à 400 cm (El-Siddig *et al.*, 2006). En l'absence d'une nappe d'eau constatée proche des sites, nous avons considéré la remontée capillaire comme étant négligeable (Aussenac *et al.*, 1984 ; Kisito *et al.*, 2006). Nous n'avons pas procédé à un apport d'eau par irrigation. Ainsi la composante de l'équation du bilan hydrique « I » ne doit pas être prise en compte. Notons que l'évapotranspiration réelle (perte d'eau par évapotranspiration est obtenue par la formule suivante :

$$ETR = T_r + I_p \quad (6.11) ;$$

où T_r représente la transpiration et I_p représente l'Interception nette.

La relation assez forte (64,3%) obtenue entre la pluviométrie enregistrée hors du couvert (par la station météorologique) et sous le houppier (par des pluviomètres installés sous les arbres), nous amène à négliger la quantité d'eau interceptée. Pour un état hydrique du sol donné et une demande évaporative de l'atmosphère donnée, les parts relatives de l'évaporation et de la transpiration dans l'ETR dépendent de la proportion de l'énergie radiative interceptée par le feuillage par rapport à celle qui parvient au sol, et donc de l'indice de surface foliaire (LAI) (Le Maire *et al.*, 2011). Ainsi, suivant la méthode de Dancette (1983) reprise par plusieurs auteurs (Kisito *et al.*, 2007 ; Moiwo *et al.*, 2011) et compte tenu de ce qui précède, calculer le bilan hydrique périodique se réduit à estimer la différence entre la pluviométrie et la variation du stock d'eau au cours de la période donnée :

- la variation du stock d'eau ($\Delta S_{(0-600\text{cm})}$) est obtenue par la différence de l'humidité volumique à 600 cm et l'horizon (0-10cm) ;
- la variation de stock périodique ($\Delta S_{P\acute{e}r}$) est définie comme étant la différence entre la variation de stock à la date 1 ($\Delta S_{(0-600\text{cm})_date1}$) et la variation du stock à la date 2 ($\Delta S_{(0-600\text{cm})_date2}$) ;
- le bilan hydrique journalier (consommation journalière) est obtenu par le rapport entre le bilan hydrique périodique et le nombre de jours entre les dates de mesures (T).

$$\Delta s = \Delta s \text{ Pér.} / T \quad (6.12) ;$$

où Δs représente le bilan hydrique, $\Delta s \text{ Pér.}$, représente le bilan hydrique périodique et T le nombre de jours.

6.2.7 *La phénologie et la fructification*

Au même titre que les paramètres physiologiques étudiés, les réponses phénologiques à long terme permettent de mieux comprendre les effets d'une contrainte hydrique (Broadhead *et al.*, 2003). Les premiers travaux sur la phénologie des ligneux ont été menés par Poupon (1979, 1980) et Akpo (1993) pour le Sénégal, Traoré (1978), Grouzis et Sicot (1980) et Grouzis et Nizinski (1991) au Burkina Faso et Kouyaté (2005) sur le *Detarium microcarpum* Gill, & Perr au Mali. Sur le tamarinier, l'on notera les travaux de Diallo (2001) au Burkina Faso.

Les stades phénologiques définis pour la présente étude se situent à deux niveaux. Ils ont été définis sur 5 arbres échantillonnés au hasard et phénotypiquement équivalents (phénologie, âge, taille et port) et dont le Dhp était compris entre 1,93-2,38 m. Une cotation en classe de pourcentage de 1 à 5, a été effectuée suivant une échelle définie par Grouzis et Sicot (1980).

$$1 = [0-20\% [; 2 = [20-40\% [; 3 = [40-60\% [; 4 = [60-80\% [; 5 = [80-100\% [$$

Le suivi a consisté en une notation de l'état de feuillaison/fructification par classe/échelle définie à une fréquence mensuelle pour chaque arbre suivi dans les deux sites de l'étude.

La feuillaison

Nous appelons le stade feuillaison, la période allant de la formation des bourgeons foliaires à la défeuillaison totale (chute totale des feuilles). Elle est marquée par quelques stades clés tels que la pleine feuillaison qui correspond à un moment où les arbres portent plus de 50% du feuillage total (Kouyaté, 2005). Les stades de feuillaison ont été définis par la méthode préconisée par Grouzis et Sicot (1980) et repris par d'autres auteurs (Diallo, 2001 ; Broadhead *et al.*, 2003 ; Kouyaté, 2005) pour les espèces ligneuses sahéliennes :

- V_0 = état de la défeuillaison totale ; et
- V_1 = état qui correspond au débourrement et au développement des premières feuilles.

La floraison et fructification

La floraison s'étend de la formation des bourgeons floraux jusqu'à la fin de la floraison qui se manifeste par la fanaison et le brunissement des fleurs. Elle est marquée par quelques stades clés tels que la pleine floraison qui correspond à un moment où plus de 50% des fleurs d'un arbre s'épanouissent. La fructification s'étend de la nouaison (début de la formation des fruits) jusqu'à la fin de la fructification (chute totale des fruits). Par

maturation des fruits, nous entendons le moment où plus de 50% des fruits d'un arbre ont mûri (Diallo, 2001 ; Kouyaté, 2005). Au niveau des 5 arbres choisis, les observations ont été faites suivant une échelle d'observation établie à partir des stades de développement floral (Diallo, 2001). Trois stades principaux caractérisent le développement floral chez le tamarinier (Diallo *et al.*, 2006 ; El-Siddig *et al.*, 2006) : stade fleur fermé (a et b), stade fleur ouverte (c et d) et stade fruits initié (e) (Figure 6.7). Ainsi six stades ont été définis en tenant compte du stade de maturation des fruits (Grouzis et Sicot, 1980) comme suit :

- Bfl (FF) = début de la floraison caractérisé par les boutons floraux ;
- FO = la pleine floraison où dominent les fleurs ouvertes ;
- FFn = la fin de la floraison marquée par la présence de fleurs fanées ;
- FRI = le début de la fructification avec l'initiation de fruits ;
- FrV = la formation des fruits verts ; et
- FrM = la maturation des fruits.

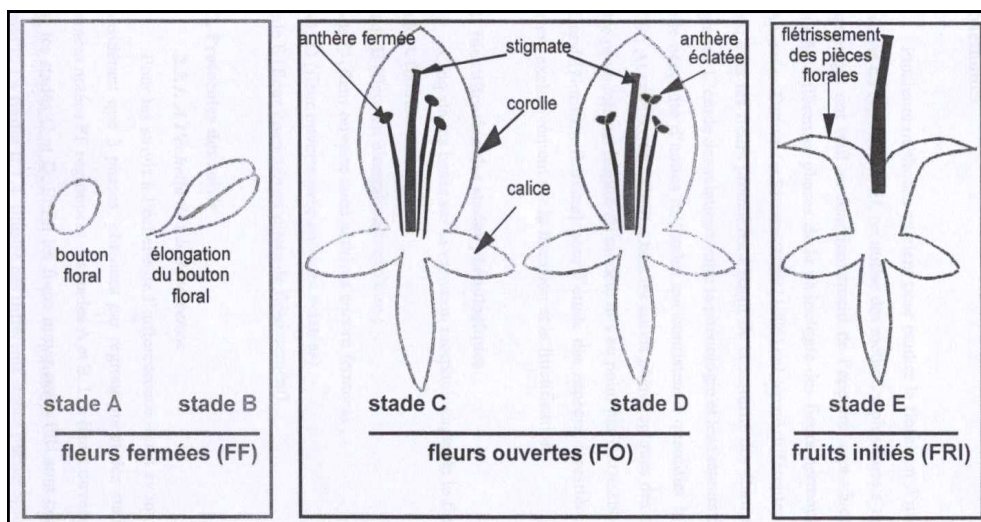


Figure 6.7: Evolution du stade floral chez *Tamarindus indica* L. (adapté de Diallo, 2001).

6.3 Traitement et analyse des données

Les données phénologiques obtenues à une fréquence des observations mensuelles sont présentées en pourcentage et sous forme de graphiques. Le pourcentage d'arbres feuillés (feuillaison) et d'arbres dont les fruits sont mûrs est calculé à partir de la formule suivante :

$$f = \frac{n}{N} \times 100 \quad (6.13) ;$$

avec f = pourcentage d'arbres ; n = nombre d'arbres feuillés ou d'arbres dont les fruits sont mûrs ;
et N = nombre total d'arbres observés.

L'analyse statistique des données a été faite à l'aide du logiciel Statistix (8.1). Toutes les données ont été testées pour la normalité et l'homogénéité des variances à l'aide du test de Levene avant l'analyse de la variance. La comparaison des moyennes a été faite à l'aide du test de Newman-Keul à 5%. Les coefficients de corrélation de Spierman ont été calculés entre toutes les variables.

6.4 Résultats

6.4.1 Les facteurs du climat (Tableau 6.1)

Le cumul de la pluviométrie obtenu au niveau des deux sites au cours de la campagne 2009/2010 (avril 2009-mars 2010) a été de 335,3 mm et de 602,2 mm, respectivement pour Niokhoul et Mbassis (Tableaux 6.1a et 6.1b). Les données climatiques obtenues sont résumées dans le tableau 6.1 ci-dessous (a & b) pour les paramètres climatiques tels que la pluviométrie (P en mm), la température maximale (Tmax en °C), la température minimale (Tmin en °C), la vitesse du vent (V en ms⁻¹) et la radiation globale (Rg en Wm⁻²).

Tableau 6.1 : Valeurs moyennes saisonnières des paramètres microclimatiques (pluviométrie, température, vitesse du vent et radiation globale) des sites de Niokhoul (a) et Mbassis (campagne agricole 2009/2010)

(a) *Niokhoul*

Saison climatique	P (mm)	Tmax (°C)	Tmin (°C)	V (ms ⁻¹)	Rg (Wm ⁻²)
SSF	0	36,3(±0,6)	19,64(±0,8)	1,4	2126,8
SSC	55,1	32,6(±0,7)	18,30(±0,7)	2,6	2828,0
SHC	280,2	37,8(±0,9)	21,08(±1,0)	1,0	2380,2
Cumul	335,3				

(b) *Mbassis*

Saison climatique	P (mm)	Tmax (°C)	Tmin (°C)	V (ms ⁻¹)	Rg (Wm ⁻²)
SSF	0	38,5(±0,8)	15,6(±0,6)	0,9	1662,8
SSC	23,5	40,5(±0,6)	20,7(±0,7)	1,8	2699,1
SHC	581,7	33,9(±0,9)	22,0(±0,8)	0,9	2216,5
Cumul	602,2				

SSF = Saison Sèche Froide ; SSC = Saison Sèche Chaude ; SHC = Saison Humide et Chaude

On peut déduire des valeurs présentées au tableau 6.1 que les températures ont été proches des moyennes obtenues de la littérature comme présentées par le tableau 6.1 (a et b) (Sarr *et al.*, 2005 ; Grouzis et Akpo, 2006). Toutefois, on observe une grande déviation pendant la saison sèche froide avec des amplitudes entre les maxima et les minima de 22,87°C à Mbassis et 16,71°C à Niokhoul.

Deux types de vent interviennent généralement dans cette région : l'harmattan, provenant du nord et du nord-est au cours de la saison sèche (SSF et SSC : novembre à mars) et la mousson soufflant du sud-ouest en saison des pluies (SHC : juin à septembre) (Fournier, 1995). Les vitesses moyennes mensuelles regroupées par saison climatique, les plus élevées ont été observées pendant la SSC et étaient de l'ordre de 2,67 ms⁻¹ et 1,88 ms⁻¹ à Niokhoul et à Mbassis, respectivement.

6.4.2 *Le potentiel hydrique foliaire*

Le maintien d'un bon état hydrique (état d'équilibre entre la consommation de la plante et l'appel d'eau atmosphérique appelé potentiel hydrique foliaire) par la plante traduit le plus souvent une forme de tolérance du déficit hydrique, tandis que la baisse du potentiel hydrique est d'autant plus accentuée que l'intensité de la contrainte hydrique subie est sévère (Maes *et al.*, 2009 ; Seghieri, 2010).

Les résultats des mesures de la variation de la cinétique du potentiel hydrique foliaire en fonction des saisons climatiques sont présentés dans la figure 6.8. Cette dernière figure montre que durant les trois saisons climatiques (saison sèche froide, saison sèche chaude et saison humide et chaude), l'augmentation de l'intensité du stress hydrique (dans la journée) s'accompagne d'un abaissement du potentiel hydrique foliaire (augmentation en valeur absolue).

On peut également observer que le potentiel de base (entre 4 à 6 h) chute de moitié quelque soit la saison de l'année, selon qu'on va du site de Mbassis (-0,75 MPa) situé en zone soudano-sahélienne au site de Niokhoul (-1,45 MPa) situé en zone sahélienne. En revanche, on note une période de récupération peu variable qui commence dès 22 h (en temps universel), quelque soit le site. Au sein d'un même site, la saison sèche froide est celle qui montre les potentiels hydriques foliaires les plus bas (-3,15 à -3,8 MPa).

En effet, à la fin des pluies, la réaction du tamarinier a consisté à une perte de la turgescence au niveau foliaire (Boyer, 1982 ; Sorrells *et al.*, 2000). Cette baisse pourrait être attribuée à la variation de l'amplitude élevée (16,71°C à 22,87°C) de la température observée pendant cette saison climatique. Le maintien d'un potentiel hydrique bas est lié à l'aptitude à extraire l'eau disponible du sol et à la capacité à limiter les pertes d'eau par transpiration (Turner *et al.*, 2001 ; Sorrells *et al.*, 2000 ; Rouhi *et al.*, 2007).

Il caractérise une stratégie d'évitement à la déshydratation (Turner *et al.*, 2001). Pendant la saison sèche chaude et pendant la saison des pluies, on note un niveau du potentiel hydrique foliaire similaire. Ceci s'expliquerait par le caractère d'adaptation développé par le tamarinier (capacité de défeuillaison totale pendant la saison sèche chaude).

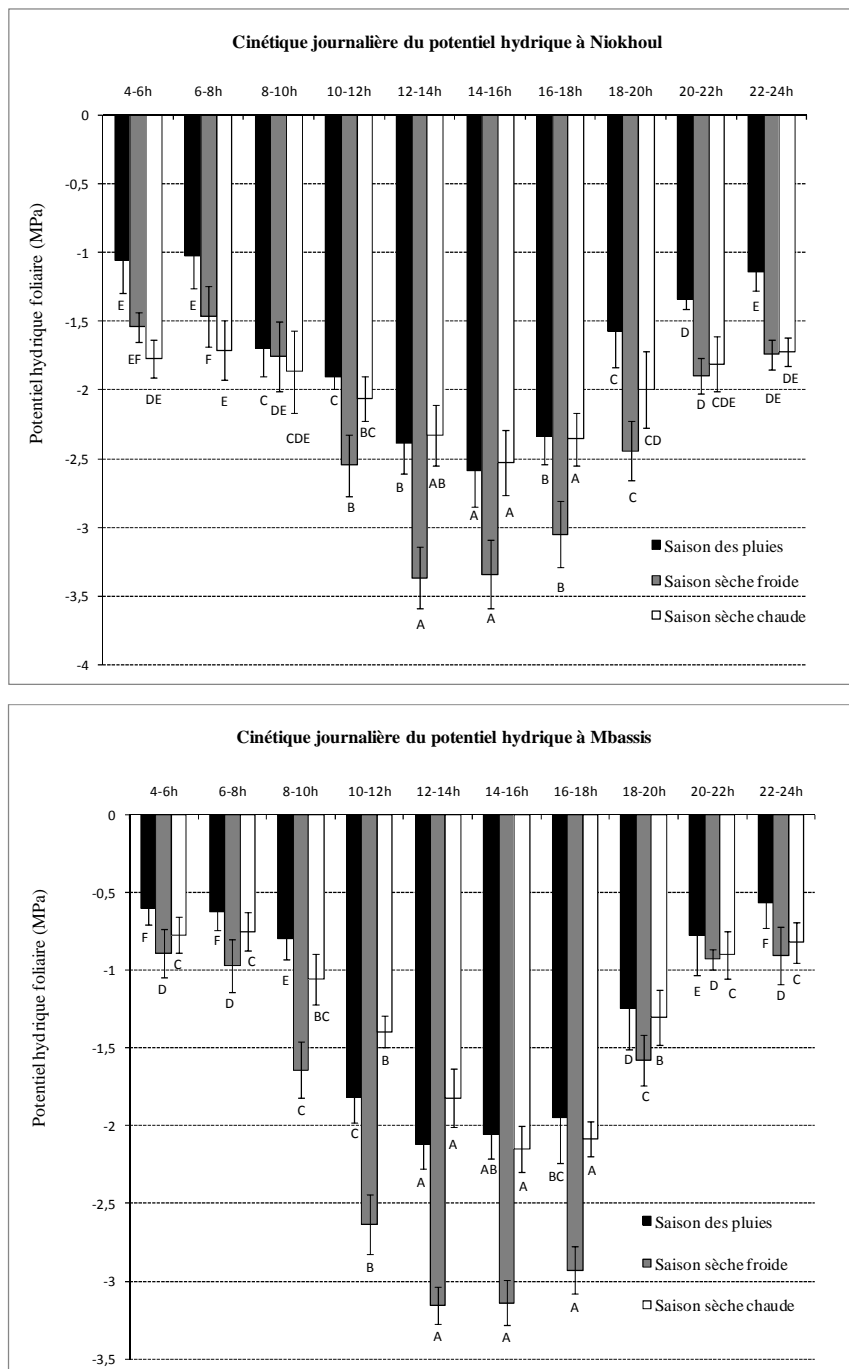


Figure 6.8 : Evolution de la cinétique journalière du potentiel hydrique foliaire du tamarinier dans deux zones agro-écologiques contrastées du Sénégal. Les barres verticales représentent les écart-types.

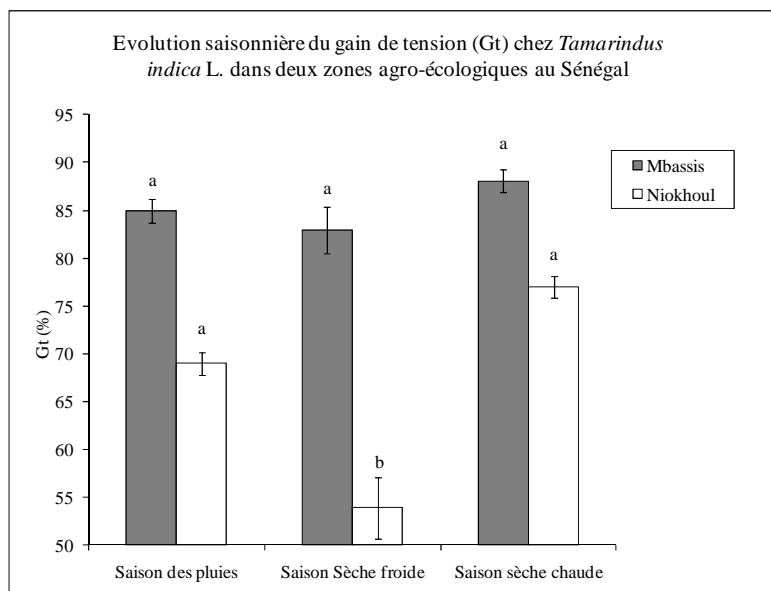
L'écart observé entre les valeurs du P_{bs} et le P_{min} est représenté par la figure 6.9(a). On observe une forte transpiration (2 MPa) des plantes de Mbassiss pendant la saison sèche froide qui s'expliquerait par une sorte de « choc hydrique », défini comme étant un assèchement rapide des profils hydriques du sol (Sorrells *et al.*, 2000), qui commence dès la fin de la saison des pluies (Turner *et al.*, 2001).

Par contre, les arbres de la zone sahélienne semblent mieux s'adapter à la sécheresse que ceux de la zone soudano-sahélienne. Ils sont caractérisés par des valeurs faibles (1,5 MPa) qui est conséquent d'un faible niveau de perte d'eau, qui pourrait être lié à un caractère d'adaptation (l'évitement) à la sécheresse (baisse du potentiel hydrique et début de la chute foliaire) (Annerose, 1990 ; Fournier, 1995 ; Turner *et al.*, 2001 ; Seghieri, 2010).

Le facteur delta (δ) diminue fortement lors des périodes de stress hydrique (saison sèche chaude). On observe son accroissement, de la valeur de 1,8 MPa (Mbassiss) à presque 2 (Niokhoul) après l'arrivée des pluies et la mise en place du nouveau feuillage.

Le gain de tension (Gt) présente une évolution inverse à celle du facteur delta, évoquant la récupération hydrique des plants surtout pendant la saison sèche froide (55% pour les plants de Niokhoul et 82% pour ceux de la zone de Mbassiss) (Figure 6.9b). En général, on note une récupération plus rapide mais aussi plus complète des plantes en zone soudano-sahélienne (85%), et moyenne en zone sahélienne pendant la saison humide pluvieuse (55 à 75%).

(a)



(b)

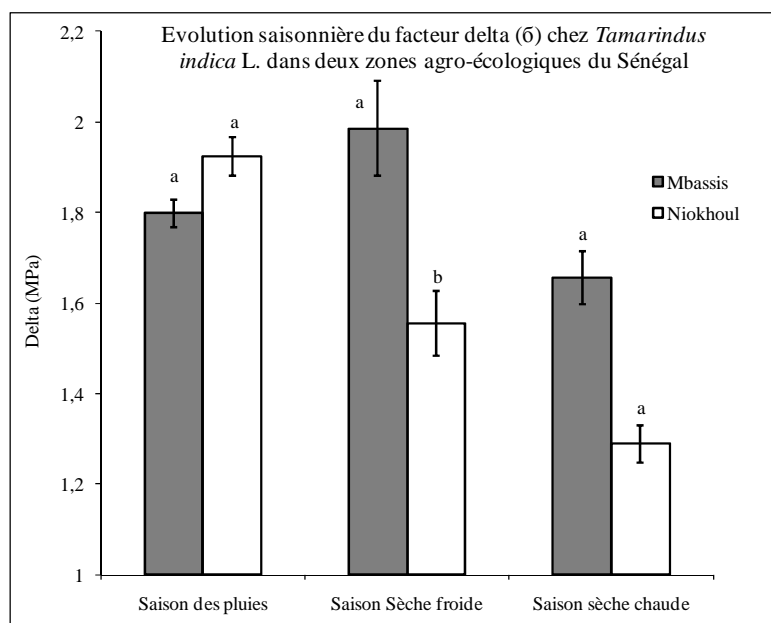


Figure 6.9 (a & b) : Evolution saisonnière comparée du gain (Gt) de tension et de l'écart $P_{sb} - P_{min}$ (δ) de deux peuplements de tamarinier en zones agro-écologiques contrastées du Sénégal. Les barres verticales représentent les écart-types.

6.4.3 Evolution saisonnière des échanges gazeux (la photosynthèse nette et l'efficacité d'utilisation de l'eau instantanée)

La photosynthèse nette et l'efficacité d'utilisation de l'eau instantanée ont été suivies à Mbassis et Niokhoul au cours de la campagne agricole 2009/2010.

La photosynthèse nette

Les moyennes de la photosynthèse nette saisonnière observées à Niokhoul (dans la zone sahélienne), présentent des différences significatives ($P < 0,05$), contrairement aux moyennes obtenues à Mbassis qui sont similaires d'une saison à une autre.

Cette situation s'explique par le fait que la stratégie de réduction de la transpiration de la plante par la fermeture des stomates à partir de l'installation du stress hydrique a induit une réduction de l'activité photosynthétique des peuplements en zone sahélienne pendant les périodes dites sèches (Figure 6.10).

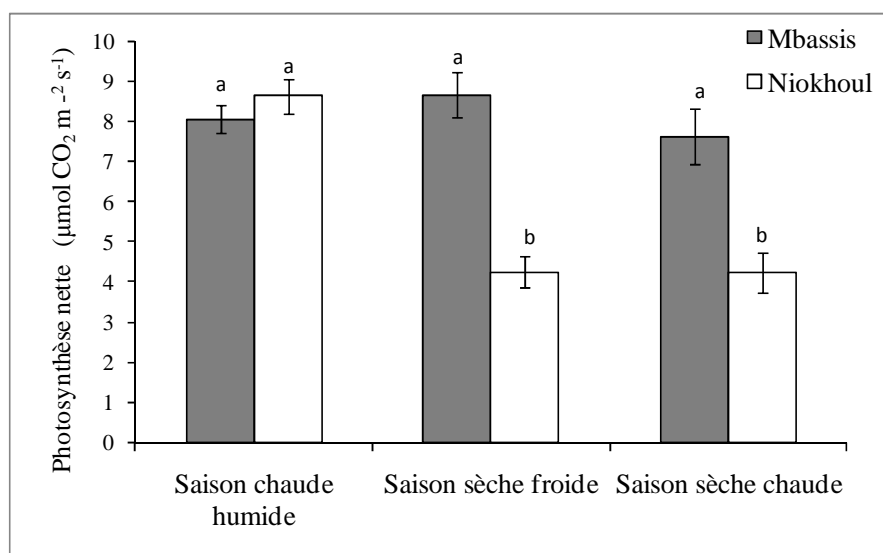


Figure 6.10 : Evolution saisonnière comparée de l'activité photosynthétique de deux peuplements de tamarinier dans deux zones agro-écologiques contrastées au Sénégal. Les barres verticales représentent les écart-types.

L'efficacité d'utilisation de l'eau

La figure 6.11 montre une évolution saisonnière de l'efficacité d'utilisation de l'eau instantanée (EUEi) pour les peuplements des deux zones agro-écologiques étudiées, en fonction des différentes périodes climatiques de l'année.

Au cours de la période de disponibilité en eau non limitée (saison des pluies), les peuplements de tamarinier de la zone du Sahel ont une EUEi plus élevée ($P < 0,05$) que celle des arbres de la zone soudano-sahélienne. La tendance à limiter la transpiration des plantes (plus marquée chez les plantes de la zone du Sahel) pendant la période sèche, s'expliquerait par le faible niveau d'utilisation de l'eau en période sèche. Par contre, le fait qu'en période de pluies (saison humide et chaude), la différence observée entre les arbres de Mbassiss et Niokhoul au niveau de leur EUEi (Figure 6.11) serait l'effet du caractère d'évitement du stress hydrique des peuplements de cette zone agro-écologique du Sahel.

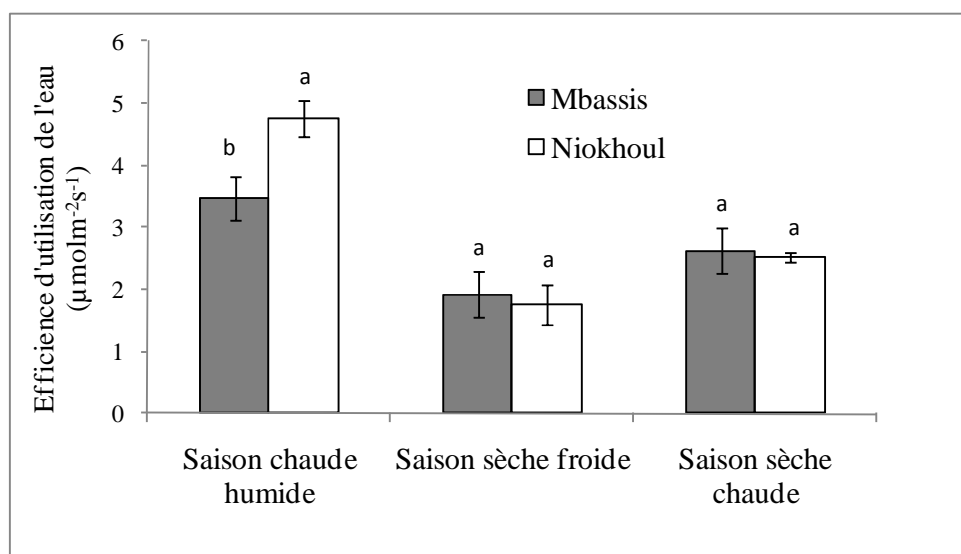


Figure 6.11 : Evolution saisonnière comparée de l'efficacité d'utilisation de l'eau de deux peuplements de tamarinier dans deux zones agro-écologiques contrastées du Sénégal. Les barres verticales représentent les écart-types.

Potentiel hydrique du sol

Les profils hydriques (Figures 6.12 et 6.13) montrent qu'en début de saison des pluies (SHC), seuls les horizons de surface (50 cm) sont humectés. Ceci serait l'effet des faibles et irrégulières pluies tombées durant la période expérimentale.

Les profils hydriques obtenus sous les tamariniers (en trait continu sur les figures 6.12 et 6.13) et le témoin (en trait interrompu sur les mêmes figures) sont similaires en termes de disponibilité de l'eau en surface (horizon 0-50 cm).

Par ailleurs, quelque soit le site, sur l'horizon 50-200 cm on note un écart (différence non significative) entre les profils hydriques obtenus sous les tamariniers et les témoins. Ceci pourrait suggérer que l'horizon d'alimentation hydrique des tamariniers se situerait entre 50 cm et 200 cm de profondeur.

Cette consommation hydrique des plants (caractérisée par l'écart entre la courbe du profil sous tamarinier et le témoin) reste néanmoins variable d'un site à l'autre et d'une saison climatique à l'autre. On observe une diminution progressive du « ventre d'humectation » (Aussenac *et al.*, 1984 ; Moiwo *et al.*, 2011) selon que l'on va de la SHC à la SSC (Figures 6.12 et 6.13).

Le ventre d'humectation est défini, comme étant cet écart de la courbe du profil hydrique qui indique le niveau de l'humidification des différents horizons du sol. En effet progressivement, dès les premières pluies les profils humidifiés s'accroissent et ce déplacement successif des horizons humectés par rapport à ligne de départ constitue le ventre d'humectation (Moiwo *et al.*, 2011 ; Mendham *et al.*, 2011)

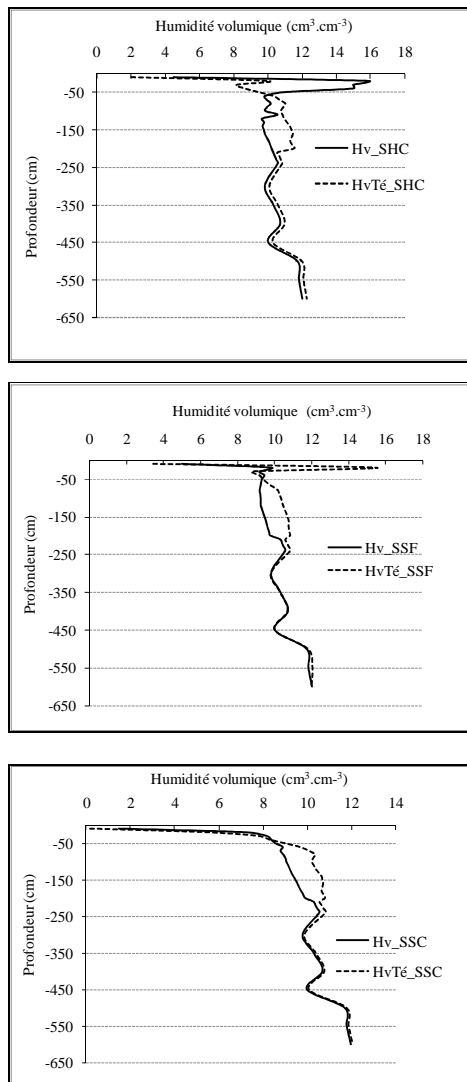


Figure 6.12 : Profils hydriques d'humectation du sol sous les tamariniers étudiés au cours des saisons SHC, SSF et SSC de la campagne agricole 2009/2010 sur le site de Mbassiss en zone soudano-sahélienne du Sénégal

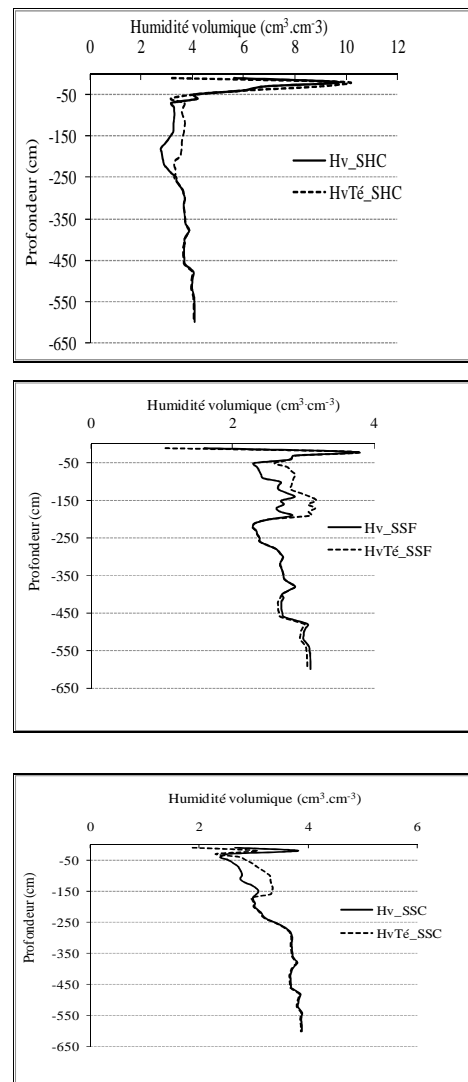


Figure 6.13 : Profils hydriques d'humectation du sol sous les tamariniers étudiés au cours des saisons SHC, SSF et SSC de la campagne agricole 2009/2010 sur le site de Niokhoul en zone sahélienne du Sénégal

On note cependant un contenu en eau (humidité volumique) des sols de Mbassis plus important SHC ($10 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$) en comparaison avec de Niokhoul ($4 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$). En plus de la pluviométrie plus importante à Mbassis (602,2 mm), cette différence de rétention en eau du site de Mbassis serait l'effet des caractéristiques pédologiques. En effet, à Niokhoul nous avons un sol sableux (90,5%) et un taux d'argile de 3,4%, contrairement à Mbassis où on a un taux de sable de 82,3% et 7,8% d'argile (Bourou *et al.*, 2010).

6.4.4 Le bilan hydrique

Les résultats du calcul du bilan hydrique sont résumés dans le tableau 6.2 ci-dessous. Il ressort que la consommation journalière en eau du tamarinier est presque nulle en période sèche. Ce résultat est observé au niveau des deux sites. Par contre, cette consommation est proportionnelle à la variation du stock d'eau du sol et a tendance à augmenter quand le facteur eau devient non limitant. L'on constate également que quelque soit le site la consommation en eau étroitement à la quantité d'eau disponible.

Tableau 6.2 : Bilan hydrique et consommation journalière du tamarinier dans deux zones agro-écologiques du Sénégal

Date	12 Juin	25 Juil.	19 Août	23 Oct.	13 Fév.	23 Mars
Pluies (mm)	0	82,8	91,9	160,6	0	0
Temps (Jours)		43	25	65	113	38
Variation du stock en eau sur 0-600 cm (mm)	195,4	197,7	210,8	175,4	173,5	186,2
La variation de stock en eau total (mm)		2,2	13,1	-35,4	-1,8	10,8
Bilan hydrique périodique (mm)		80,57	78,79	196,00	1,83	-10,81
Consommation journalière en eau (mm)		1,9 ^a	3,2 ^b	3,0 ^b	0,02 ^b	0,3 ^b

(a) *Niokhoul*

Date	1 ^{er} mai	24 Juil.	17 Août	21 Oct.	10 Fév.	13 Mars
Pluies (mm)	0	82,8	202,4	321	0	0
Temps (Jrs)		84	24	65	112	31
Variation du stock en eau su 0-600 cm (mm)	583,9	596,9	633,5	625,3	536,3	516,3
La variation de stock en eau total (mm)		13,0	36,6	-8,2	-89,0	-20,0
Bilan hydrique périodique (mm)		69,7	165,8	329,2	88,9	20,0
Consommation journalière en eau (mm)		0,8 ^a	6,9 ^a	5,1 ^a	0,8 ^a	0,6 ^a

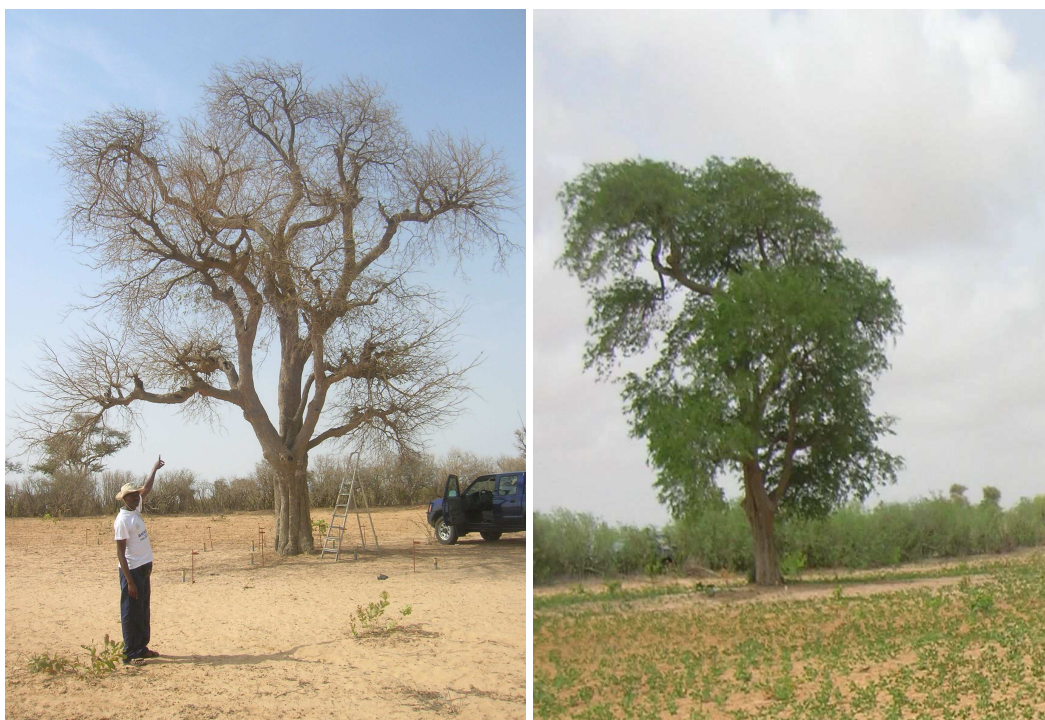
(b) *Mbassis*

6.4.5 La phénologie, floraison et fructification

L'analyse de la présentation du spectre phénologique du tamarinier dans la figure 6.14 permet de situer la période du début de l'installation de la phase de feuillaison à la troisième décade du mois de mars et début avril. Cette feuillaison atteint son volume foliaire maximal pendant la saison des pluies (juillet/août) quelque soit le site. On note une période de chute partielle (Mbassis) et presque totale (Niokhoul) des feuilles à partir du mois de novembre. Cette défeuillaison dure presque 2 mois et demi à Niokhoul. A la mi-mars, l'état de la feuillaison des arbres est moins de 20% à Niokhoul. A Mbassis, cette période sans feuille s'étale jusqu'en fin avril caractérisée par une chute foliaire toute légère, estimée à 5% environ du volume foliaire total des arbres observés.

La floraison démarre avec un retard par rapport à la feuillaison. Elle commence à partir de la première décade du mois d'avril (Mbassis) et la deuxième décade du mois de mai (Niokhoul). Le maximum du taux de floraison (42%) des arbres est observé à Mbassis dès la première décade du mois de juillet tandis qu'à Niokhoul nous avons obtenu un taux de 27% durant la deuxième décade du mois de septembre.

Dans les deux cas, on n'observe pas un étalement dans le temps du pic floral. La chute florale est observée après le début de l'installation du stress hydrique. Cette chute correspond dans les deux sites à la phase des précipitations irrégulières (mi-septembre à Mbassis et fin août à Niokhoul).

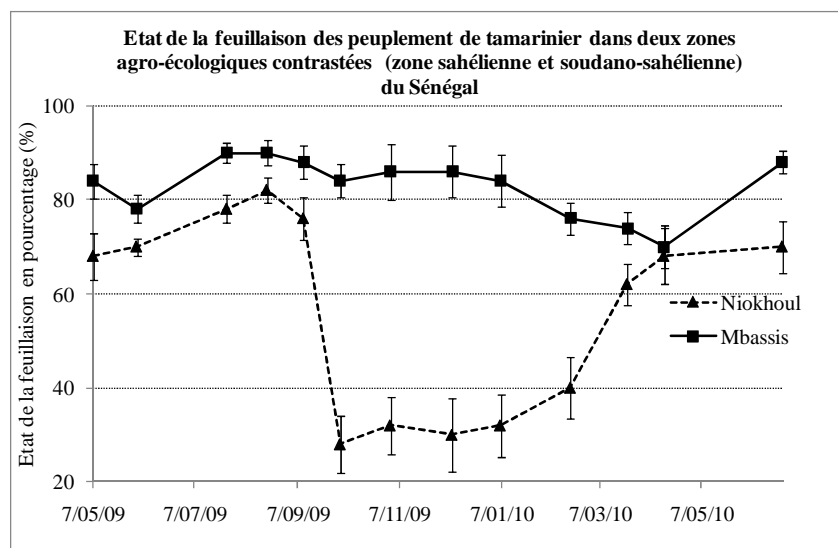


(a) Pendant la saison sèche

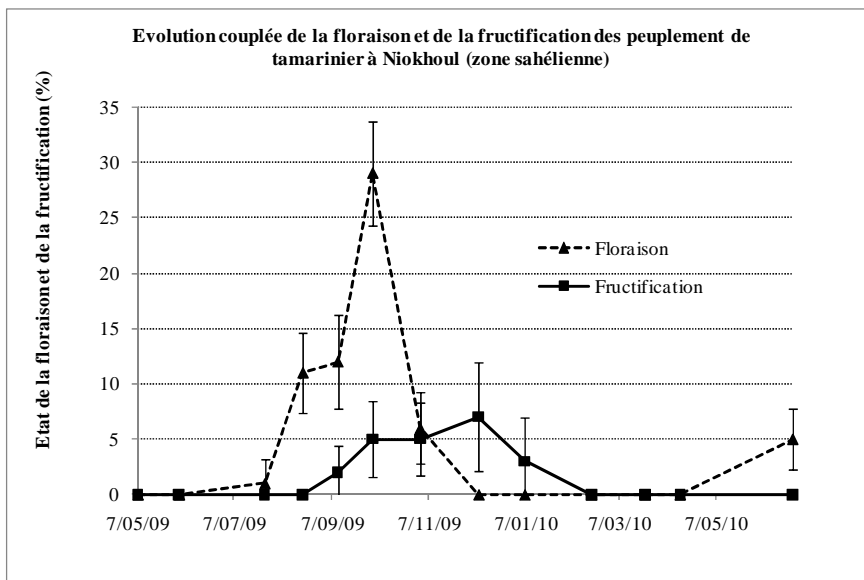
(b) pendant la saison des pluies

Photo 6.2 : Évolution de l'état de feuillaison du tamarinier en conditions d'alimentation hydrique sévère (a) et pendant la période pluvieuse (b) à Niokhoul au Sénégal.

(a)



(b)



(c)

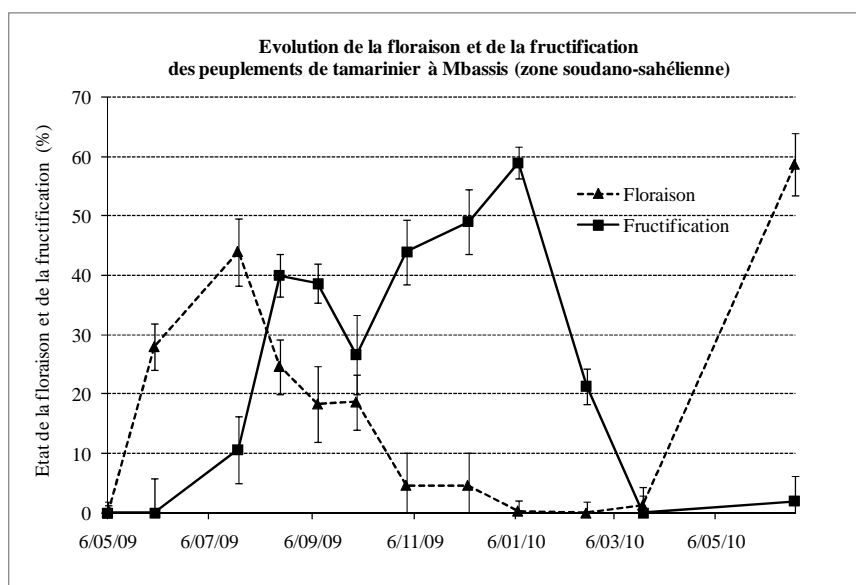


Figure 6.14 : Evolution de l'état de feuillaison, floraison et fructification de deux peuplements de tamarinier dans deux zones agro-écologiques contrastées du Sénégal. Les barres verticales représentent les écart-types.

La fructification commence par la nouaison des fruits verts de manière simultanée avec la floraison. Cependant, on constate que dans les deux sites, le pic de fructification atteint son maximum à Mbassiss (60%) et à Niokhoul (8%) deux mois après celui du pic floral.

Par ailleurs, on a observé un faible taux de fructification (8%) des arbres à Niokhoul. Ceci serait lié au faible taux (27%) de floraison et peut être considéré comme une conséquence du faible niveau de disponibilité en eau dans le sol observé. On a pu constater une défeuillaison totale (Photo 6.2) de certains arbres du peuplement, ramenant ainsi le taux de feuillaison à un taux beaucoup plus bas (20%). Cet état phénologique (chute foliaire) est la principale forme de réponse du tamarinier à un stress hydrique sévère.

6.5 Discussion

En condition de sécheresse, la baisse du potentiel hydrique des plantes induit une importante perte de turgescence au niveau des feuilles (Sorrells *et al.*, 2000 ; Maes *et al.*, 2004). Le maintien d'un potentiel hydrique bas au niveau des plantes est lié à leur aptitude à continuer d'extraire de l'eau du sol et à la capacité à limiter les pertes en eau par transpiration (Turner *et al.*, 2001). C'est le cas observé dans cette étude des peuplements de tamarinier. Cette situation caractérise une stratégie de l'évitement à la déshydratation (Logan *et al.*, 2011). Les espèces ou les variétés les plus sensibles montrent alors des valeurs du potentiel hydrique plus négatives que les plantes résistantes à la sécheresse (cas du peuplement de Niokhoul) (Maes *et al.*, 2004).

Le potentiel de base et minimal varient entre des valeurs minimales en saison chaude humide (-0,6 à 1 MPa) et des valeurs plus élevées en saison sèche froide (0,8 à 1,5 MPa). La hausse du potentiel hydrique s'amorce progressivement avec l'arrivée des premières pluies. Les tendances observées confirment celles obtenues sur d'autres espèces ligneuses tropicales telles *Acacia raddiana* (Sop *et al.*, 2011), *Boscia senegalensis*, *Balanites aegyptiaca*, *Ziziphus mauritiana*, *A. senegal*, *A. tortilis* et *Combretum glutinosum* (Jacques *et al.*, 2010 ; Sop *et al.*, 2011 ; Craven *et al.*, 2011). Il s'agit en effet des contrastes marqués entre les niveaux des contraintes environnementales et hydriques saisonnières d'une part et la variation du potentiel hydrique et du niveau de récupération d'autre part (Sop *et al.*, 2011 ; Craven *et al.*, 2011).

La faculté à retrouver l'équilibre hydrique (récupération) des plantes qui ont subi un stress hydrique avait été soulignée par divers auteurs (Eyog-Matig et Dreyer, 1991 ; Fournier, 1995 ; Maes *et al.*, 2004 ; Logan *et al.*, 2011 ; Craven *et al.*, 2011 ; Carter et Nippert, 2012). Elle serait liée à une bonne tolérance protoplasmique (intérêt du maintien de l'activité enzymatique cellulaire pour la résistance à la sécheresse),

qui permettrait de minimiser les effets de la sécheresse par le phénomène d'ajustement osmotique. Nous avons pu observer dans cette étude une augmentation (dans le temps) du potentiel hydrique de la plante liée à l'accroissement de l'amplitude thermique et de l'humidité relative. Elle reflète les niveaux de disponibilité en eau dans la rhizosphère corroborant ainsi les résultats de Craven *et al.* (2011) sur six espèces ligneuses tropicales (*Terminalia amazonia*, *Inga punctata*, *Colubrina glandulosa*, *Pseudosamanea guachapele* and *mangium*, *Acacia raddiana*, *Acacia mangium*). L'évolution du potentiel hydrique (de base et minimal) révèle une progression parallèle à celle de la disponibilité en eau du sol. Ceci a été mis en évidence par les résultats de plusieurs autres auteurs (Kisito *et al.*, 2007 ; Jacques *et al.*, 2010 ; Sop *et al.*, 2011). Ces résultats confirment également ceux de certains auteurs (Fournier, 1995 ; Seguiéri, 2010) qui indiquent que l'évolution saisonnière du potentiel de base pourrait être utilisée comme critère d'appréciation de l'évolution du stock d'eau du sol.

Le δ (delta) du facteur diminue au fur et à mesure que la saison sèche progresse. Cette baisse traduit, selon la littérature, une réduction de la transpiration des feuilles par la fermeture stomatique ou défoliation des plantes en condition de stress, accompagnée par une perte de la conductance hydraulique (Kisito *et al.*, 2007 ; Roussel, 2008). Nous avons pu observer pour le cas du tamarinier une bonne capacité de récupération de la plante en saison humide chaude à Mbassis (> 80%) et à Niokhoul (70%). Cependant, cette récupération baisse avec l'installation de la sécheresse (saison sèche froide) surtout en zone sahélienne (pour rester à 55%) et reste stable dans la zone soudano-sahélienne (82%). Ces valeurs en zone soudano-sahélienne restent similaires à celles observées sur *Acacia mangium* en zone sahélienne (Craven *et al.*, 2011) et sur *Guiera senegalensis* et *Piliostigma reticulatum* en zone soudano-sahélienne du Sénégal (Kisito *et al.*, 2007). Ceci laisse penser qu'*A. mangium* pourrait avoir une meilleure capacité de tolérance au déficit hydrique que le tamarinier.

Concernant les paramètres des échanges gazeux mesurés ici notamment la photosynthèse nette, on a pu observer que la disponibilité de l'eau en saison des pluies (SHC), permet une activité photosynthétique similaire dans les deux sites. La différence significative ($P < 0,05$) observée pendant la saison sèche (froide ou chaude) serait due au fait que dans le site de Niokhoul (en zone sahélienne), la réponse d'adaptation du peuplement de tamarinier face aux effets du déficit hydrique a été la chute foliaire ce qui réduit ainsi la surface photosynthétiquement active. A Mbassis (zone soudano-sahélienne) par contre, la plante procède d'abord à une baisse de son potentiel hydrique qui serait suffisante pour stabiliser l'équilibre hydrique et donc de garder les feuilles. Cette stratégie d'adaptation qui consiste à baisser son potentiel hydrique serait la principale forme de réaction du tamarinier face à un déficit hydrique. Ces

résultats corroborent ceux obtenus sur des variétés de niébé (*Vigna unguiculata*) par Falalou (2006) et sur l'arachide (*Arachis hypogaea*) par Annerose (1990) et Craven (2011) sur les espèces ligneuses tropicales.

La fermeture des stomates pour contrôler la transpiration, intervient en premier lieu dans la réponse à un stress hydrique (à l'échelle de la journée). Ensuite, l'architecture hydraulique est affectée (échelle du mois), puis l'indice foliaire (échelle de l'année) (Rambal, 1993 ; Rouhi *et al.*, 2007). Nos résultats confirment ceux obtenus par Magnani *et al.* (2002) qui montrent que les différentes réponses des plantes à une sécheresse extrême vont dans le sens d'une conservation de l'équilibre de l'utilisation de l'eau.

La durée de vie des feuilles du tamarinier est donc fonction du niveau de stress hydrique. Si la chute des feuilles est accélérée, la transpiration serait réduite ce qui permettrait de diminuer les contraintes hydriques sur les arbres. La modification de la durée de vie des feuilles pourrait également affecter la circulation interne de l'azote (re-translocation de l'azote des feuilles âgées vers les jeunes pousses en croissance) et par conséquent l'assimilation du carbone (Escudero *et al.*, 1992 ; Davies *et al.*, 1993 ; Rouhi *et al.*, 2007). Si la photosynthèse augmente, l'efficacité d'utilisation de l'eau pourrait elle aussi être modifiée et augmenter (Reichstein *et al.*, 2002 ; Rambal et Hoff, 2003 ; Rouhi *et al.*, 2007 ; Maes *et al.*, 2009). Meinzer (2003) et d'autres auteurs ont montré une convergence fonctionnelle entre les espèces ligneuses, notamment sur l'utilisation de l'eau (Deblonde et Ledent, 2000 ; Pataki *et al.*, 2000 ; Mencuccini, 2002).

En définitive, le mécanisme d'adaptation du tamarinier au déficit hydrique serait celui de l'évitement, décrit par divers auteurs (Khalifaoui, 1985 ; Lacape, 1996 ; Nwalozi et Annerose, 1996 ; Rouhi *et al.*, 2007 ; Roussel, 2008 ; Maes *et al.*, 2009). En effet, la plante procède d'abord à une baisse du potentiel hydrique (cas du peuplement de Mbassis) et en cas de déficit hydrique continue, elle y intègre la réduction de la surface foliaire par la chute progressive des feuilles et fleurs qui peut aller jusqu'à la défoliation totale (cas du peuplement de la zone sahélienne à Niokhoul).

Chapitre 7

**Conclusions générales et
recommandations.**

Le présent travail a été conduit au Sénégal, dans le cadre du projet DADOBAT-FP6-2004-INCO-DEV-3 (*Domestication And Development Of Baobab and Tamarind*). Ce projet a débuté en décembre 2006 et s'est achevé en décembre 2010. Il a concerné six pays dont trois du nord (Belgique, Autriche et Angleterre) et trois du sud (Sénégal, Mali et Bénin). Il s'est fixé cinq objectifs majeurs : (1) l'évaluation du germplasm des deux espèces à partir d'une collection sous-régionale (dans les trois pays concernés et en fonction des zones agro-écologiques) ; (2) le développement de techniques de domestication des meilleurs germoplasmes ; (3) la caractérisation éco-physiologique du germplasm *in situ* et *ex situ* ; (4) l'évaluation des propriétés nutritionnelles et médicinales des différentes parties de la plante ; et *in fine* (5) le développement du matériel végétal amélioré et adapté au système agro-forestier.

Les résultats obtenus dans le cadre de ce travail intègrent l'objectif 3 du projet DADOBAT. Le travail a concerné l'étude éco-physiologique du tamarinier (*Tamarindus indica* L.) en milieu tropical aride. Pour y parvenir, 4 objectifs spécifiques lui ont été associés : (1) identifier les facteurs climatiques déterminant la distribution du tamarinier au Sénégal ; (2) évaluer la diversité biotique (mycorhizienne) associée à la plante *in situ* au Sénégal ; (3) évaluer les effets de l'inoculation mycorhizienne sur les paramètres physiologiques des écotypes de tamarinier du Sénégal ; et (4) caractériser les mécanismes de gestion de l'eau du tamarinier *in situ*. Pour atteindre ces objectifs, une revue bibliographique a été réalisée pour faire l'état des connaissances sur l'espèce et les thématiques traitées et des expérimentations ont été menées sur le terrain au Sénégal.

7.1 Densité et distribution du tamarinier (*Tamarindus indica* L.) au Sénégal, évaluation du potentiel d'adaptation au changement climatique

Dans le cadre de ce chapitre, l'objectif a été d'évaluer la densité actuelle et future de la distribution du tamarinier au niveau régional (Sénégal). Pour y parvenir on s'est basé sur deux approches méthodologiques : La densité de peuplement a été évaluée en fonction des zones agro-écologiques du Sénégal. Trente sites de peuplement de tamarinier ont été identifiés à l'issue d'une enquête semi-structurée, basée sur les données d'information obtenues auprès des services décentralisés du Ministère de l'Environnement et des Forêts. Le nombre d'arbres par km² de chaque site a été compté en utilisant par site la méthode de transect (Assogbadjo, 2006).

L'enquête effectuée dans le cadre du choix des sites de peuplement a été complétée par des visites de terrain où l'on a relevé les coordonnées géographiques des sites de présence ou d'absence du tamarinier ont été relevées. Des données climatiques ont été obtenues à partir du site <http://www.worldclim.org/bioclim> à une résolution 2,5 x 2,5 minutes. Le modèle MAXENT a été utilisé

pour la prédiction du peuplement à partir des modèles climatiques CCCMA-CGCM2, CSIRO-MK2, NIES99 et UKMO-HADCM3 et pour les années 2020, 2050 et 2080. Les résultats obtenus ont montré une baisse significative ($P < 0,05$) de la densité du peuplement de tamarinier au km² en allant de la zone soudanienne (7 arbre au km²) vers la zone sahélienne (1 arbre au km²).

Les résultats obtenus par le modèle MAXENT, ont montré les variables climatiques explicatives de la distribution du tamarinier au Sénégal. Ainsi la variation saisonnière de la température de l'air, la température maximale du mois le plus chaud, la précipitation du mois le plus arrosé et la précipitation du trimestre le plus arrosé, ont été les plus déterminantes. La probabilité d'occurrence du *T. indica* est perçue baisser dans des zones à haute température, le seuil optimal étant à 30°C. On observe une baisse importante à partir de 40°C. Le seuil supérieur de la pluviométrie optimale a été constaté à 900 mm/an.

Les prédictions du peuplement futur ont montré, que la zone située dans le sud-est du Sénégal qui avait été prédite être propice actuellement, est annoncée être non propice par les 4 modèles/scénarios climatiques utilisés. Toutefois, la zone du centre (la région du bassin arachidier) resterait toujours propice pour le développement du tamarinier. A l'horizon 2080, les résultats montrent une réduction importante de la zone optimale de développement du tamarinier au Sénégal. Une disparition quasi-totale de la zone favorable au développement du tamarinier est prédite au Sénégal à l'horizon 2080. Les raisons énoncées sont discutables et de plusieurs ordres : anthropiques (destruction des arbres par une pression élevée sur le bois) (Ribot, 1999) et climatiques (élévation des températures). Dans le cadre des études de prédiction de la distribution des espèces, des incertitudes existent (Meehl *et al.*, 2007). Le rapport du GIEC (Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat), note par exemple l'incohérence dans les projections des précipitations pour l'Afrique, ainsi le Sahel serait plus ou moins humide, à l'avenir (horizon 2050 à 2080). Pour toutes ces raisons, les résultats de cette étude doivent être considérés avec précaution et en tenant compte de ces aléas d'incertitude possible dans les modèles de prédiction.

7.2 Diversité mycorhizienne et l'interaction plante/mycorhizes

Les principaux objectifs attendus l'étude de la diversité mycorhizienne associée au tamarinier et de l'interaction plante/mycorhize sont de : (i) caractériser la diversité des champignons mycorhiziens associés à la rhizosphère du tamarinier *in situ* au Sénégal ; (ii) évaluer le potentiel mycorhizien (fréquence de mycorhisation et le taux de colonisation racinaire) des parcs à tamarinier ; (iii) évaluer les effets des souches mycorhiziennes sur les variables de croissance de quelques écotypes de tamarinier du Sénégal en conditions d'alimentation hydrique variées ; et (iv) de caractériser l'influence de l'inoculation mycorhizienne sur le fonctionnement éco-physiologique de ces écotypes du tamarinier. Les méthodes et

techniques utilisées ont été présentées dans les chapitres (4 & 5). Il ressort de la présente étude les résultats suivants :

❖ **Diversité mycorhizienne**

Trois genres de champignons mycorhiziens à arbuscules (*Acaulospora* spp., *Glomus* spp. et *Scutellospora* spp.) ont été associés au tamarinier (*Tamarindus indica*) dans les zones étudiées (au Sénégal). Ces champignons mycorhiziens ont été largement décrits par plusieurs auteurs (Taylor et Alexander, 2005 ; Alagely et Ogram, 2006 ; Romos-Zapata *et al.*, 2011) et il ressort que le genre *Glomus* est le plus abondant. L'analyse en composantes multiples (Figure 4.5 ; chapitre 4) montre que ces genres mycorhiziens sont liés aux sites de Sakal, Niokhoul et Mbassis, caractérisés par des sols sableux (70-90%). Ces résultats ont montré que *T. indica* a un large spectre d'association mycorhizienne, ce qui a été également prouvé par des études antérieures (Ba *et al.*, 2001 ; El-Siddig *et al.*, 2006 ; Alagely et Ogram, 2006).

❖ **Les potentiels mycorhiziens des parcs à tamariniers**

Les résultats obtenus (chapitre 4) ont montré que les racines des arbres de tamarinier de la zone sahélienne sont plus colonisées par les champignons mycorhiziens arbusculaires (11,17%) comparées à celles de la zone soudano-sahélienne et soudanienne. En outre, nos résultats ont montré une diminution de la fertilité des sols (4,60% de matière organique du sol) dans la zone soudanienne par rapport à ceux du Sahel (0,34%) (Tableau 4.2 ; chapitre 4). Le taux de colonisation racinaire des plants de tamarinier élevé sur sol pauvre pourrait être expliqué par une forme d'adaptation des plantes à des stress de plusieurs natures (déficit hydrique par le faible niveau de rétention de l'eau du sol, le faible niveau de fertilité du sol, etc.) dans un environnement aride et sec (Déziel, 2000). Par ailleurs l'analyse en composante multiple effectuée sur les matrices de corrélation (à l'aide de la méthode PLS) a indiqué que la densité des propagules viables (MPN) des champignons mycorhiziens arbusculaires, le pH du sol (eau), pH (KCl) et le sodium (Na) du sol sont étroitement liés. Cette étude souligne l'importance de l'exploration et l'exploitation de la diversité naturelle des champignons mycorhiziens arbusculaires comme point de départ pour formuler des inoculas comme bio-fertilisants.

❖ **Les effets des souches mycorhiziennes sur les variables de croissance de quelques écotypes de tamarinier**

Deux souches mycorhiziennes (*Glomus mosseae* (Gm), *G. aggregatum* (Ga)) ont été utilisées pour cette étude. Les écotypes de tamarinier provenaient de trois zones agro-écologiques du Sénégal (sahélienne, soudano-sahélienne et soudanienne).

Les résultats n'ont pas montré de différences significatives de réponse à l'inoculation mycorhizienne entre écotypes/provenances de tamarinier. Quelque soit la variable (physiologique ou morphologique) considérée, il n'existe aucune différence significative entre les provenances des zones sahélienne, soudano-sahélienne et soudanienne. Par ailleurs, l'on a noté des différences significatives ($P < 0,05$) pour les variables morphologiques (diamètre au collet et hauteur des plants) et les paramètres éco-physiologiques (photosynthèse nette, conductance stomatique et l'efficacité d'utilisation de l'eau) entre les plantes inoculées et les plantes témoins. Cette étude a montré clairement que (i) la croissance du tamarinier est améliorée par la présence du champignon mycorhizien du genre *Glomus* ; et (ii) la contribution de l'association des mycorhizes à la capacité de résistance à la sécheresse du tamarinier.

Ces résultats semblent conformes avec ceux des autres études dans lesquelles il a été démontré que l'inoculation mycorhizienne peut aider à améliorer la croissance et la résistance à la sécheresse. Par contre, l'amélioration de l'efficacité d'utilisation de l'eau instantanée (EUEi) des plantes inoculées, s'oppose aux résultats obtenus par Guissou *et al.* (2001), qui montrent que les effets du stress hydrique sur l'EUEi pourraient varier avec le champignon mycorhizien, la plante hôte, l'intensité et la durée d'exposition des plants au stress hydrique (Sylvia *et al.*, 1993 ; Ruiz-Lozano *et al.*, 1995 ; Rouhi *et al.*, 2007 ; Maes *et al.*, 2009).

7.3 Analyse du fonctionnement hydrique du tamarinier

Plusieurs outils et méthodes ont été utilisés dans le cadre de cette étude. Leur présentation et description ont fait l'objet du chapitre 6. Le présent travail qui a été effectué sur des sujets adultes de *T. indica in situ* vise principalement à : (1) comprendre et décrire les stratégies physiologiques de gestion de l'eau du tamarinier en conditions arides ; et (2) comprendre les incidences de cette stratégie de gestion de l'eau sur la phénologie et la productivité.

L'étude a été menée sur deux peuplements : un situé dans la zone agro-écologique sahélienne (Niokhoul) et l'autre dans la zone soudano-sahélienne (Mbassis). Les observations ont concerné plusieurs variables ; (i) physiologiques : le potentiel hydrique foliaire, les échanges gazeux ; (ii) le bilan hydrique et ; (iii) les paramètres de production (la phénologie et la fructification).

L'analyse des résultats obtenus montre que le mécanisme d'adaptation du tamarinier au déficit hydrique serait l'évitement, décrit par divers auteurs (Khalfaoui, 1995 ; Lacape, 1996 ; Nwalozie et Annerose, 1996 ; Rouhi *et al.*, 2007 ; Maes *et al.*, 2009 ; Seghieri, 2009). La plante procède d'abord par une baisse du potentiel hydrique (cas du peuplement de Mbassis) et en cas de déficit hydrique sévère, elle y intègre

la réduction de la surface foliaire par la chute progressive des feuilles et fleurs qui peut aller jusqu'à la défoliation totale (cas du peuplement de la zone sahélienne).

7.4 Recommandations

Au terme de cette présente étude, il est important de dégager quelques axes à venir d'orientation mais également de mettre en exergue les limites les plus majeures de ce travail de recherche.

A- Les limites ou contraintes majeures pour cette présente étude

L'évaluation de la densité de peuplement des tamariniers au Sénégal n'a pas eut en soit une limite, même si une partie du pays a (la Casamance) été exclue de notre étude pour des raisons d'ordre sécuritaire. Cependant, partant du seul fait que la modélisation de la distribution du peuplement du *T. indica* au Sénégal soit basée uniquement sur les seuls paramètres des variables climatiques en excluant d'emblée les paramètres sociologiques/anthropiques (pratiques culturelles, importance sociale de l'espèce), physiques (relief, pente du sol) et biologiques (le pH du sol, photopériodisme et maladies) en est une limite. En effet on ne saurait réduire la dynamique de peuplement d'une espèce biologique aux seules variables climatiques.

L'identification des espèces mycorhiziennes isolées du *T. indica* a été effectuée à l'échelle du genre. Ce niveau d'identification basée sur les caractéristiques morphologiques des spores mycorhiziennes peut être considéré comme une limite. En effet des outils et méthodes scientifiques plus précis ont été développés récemment, il serait donc judicieux de procéder à cette identification par les outils moléculaires, notamment des marqueurs moléculaires.

Le système taxonomique des champignons mycorhiziens a été basé sur l'interprétation des caractéristiques morphologiques des spores (Schüßler *et al.*, 2001 ; Rosendahl, 2007). L'interprétation de ces caractères morphologiques a abouti à plusieurs controverses entre les biologistes. La discussion principale a porté sur la paroi de la spore, et les différentes couches qui composent cette paroi. En effet plusieurs utilisateurs de la classification trouvent qu'il est très difficile d'identifier les espèces sur la base des descriptions seules des parois des spores (Schüßler *et al.*, 2001 ; Rosendahl, 2007), et certains affirment que le nombre des parois dépend plus de l'âge de la spore et donc ne devrait pas être considéré comme un caractère de distinction fondamentale pour une identité taxonomique réelle.

La durée de l'essai de l'évaluation des effets de l'interaction plante/mycorhizes, a été courte (4 mois) alors que certains auteurs (Echairi *et al.*, 2008 ; Leye *et al.*, 2009 ; Fernando *et al.*, 2010) suggèrent 12

mois pour mieux mettre en exergue les effets de la mycorhisation sur les paramètres de croissance des espèces ligneuses tropicales.

B- Axes d'orientation de l'étude

Au vue des limites observées, il serait nécessaire de compléter à l'avenir ce présent travail par quelques études ; (1) une étude sur la variabilité de la réponse à la tolérance au stress hydrique est à envisager avec différentes souches ou espèces de champignons mycorhiziens et sur une collection plus importante de tamariniers en utilisant d'autres critères physiologiques/biochimiques d'évaluation tels que la teneur en proline, en ABA (acide abscissique), ascorbate peroxydase (APX) et/ou le superoxyde dismutase (SOD) ; (2) une étude de la diversité mycorhizienne basée principalement sur une identification moléculaire des souches mycorhiziennes est à entreprendre ; (3) une caractérisation plus précise (au niveau biochimique et cellulaire) de la stratégie de l'évitement du tamarinier est à envisager. Ceci permettra de mettre en évidence les paramètres clés qui induisent cette réaction de la plante face au déficit hydrique ; (4) en fin au vue des résultats générés les décideurs sénégalais et de la sous région doivent entreprendre des actions concrètes de conservation et de gestion durable des peuplements de l'espèce *T. indica*.

Références bibliographiques

Akpo E (1993). Influence du couvert ligneux sur la structure et le fonctionnement de la strate herbacée en milieu sahélien : les déterminants écologiques. *TDM, ORSTOM Paris*, 174 p.

Alagely A & Ogram A (2006). *Soil Microbial Ecology: Laboratory Exercises* India 68 p.

Aliasgharzadeh N, Saleh R, Towfighi H & Alizadeh A (2001). Occurrence of arbuscular mycorrhizal fungi in saline soils of the Tabriz Plain of Iran in relation to some physical and chemical properties of soil. *Mycorrhiza*, 11 : 119-122.

Annerose D (1990). Recherches sur les mécanismes physiologiques d'adaptation à la sécheresse. Application au cas de l'arachide (*Arachis hypogaea*) cultivé au Sénégal. *Thèse de doctorat, université Paris VII*, 282 p.

Anthelme F, Waziri M, De Boissieu B & Giazzi F (2006). Dégradation des ressources végétales au contact des activités humaines et perspectives de conservation dans le massif de l'Aïr (Sahara, Niger). *Vertigo – La revue en sciences de l'environnement* 7 : 1-12.

Arafat A & Abdel L (2011). Influence of arbuscular mycorrhizal fungi and copper on growth, accumulation of osmolyte, mineral nutrition and antioxidant enzyme activity of pepper (*Capsicum annuum* L.). *Mycorrhiza*, 21: 495–503

Ashwani K, Satyawati, S & Saroj M (2010). Influence of Arbuscular Mycorrhizal (AM) Fungi and Salinity on Seedling Growth, Solute Accumulation, and Mycorrhizal Dependency of *Jatropha curcas* L. *J Plant Growth Regul* 29: 297–30

Assogbadjo A (2006). Importance socio-économique et étude de la variabilité écologique, morphologique, génétique et biochimique du baobab (*Adansonia digitata* L.) au Bénin. *Thèse de doctorat, Ghent University (Belgium), Ghent*, 239 p.

Aussenac G, Granier A et Ibrahim M (1984). Influence du dessèchement du sol sur le fonctionnement hydrique et la croissance du Douglas (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco) *Oecol: Plant.*, 5: 241-253.

Austin M (2002). Spatial prediction of species distribution: an interface between ecological theory and statistical modelling. *Ecological Modelling* 157: 101-118.

Ba A & Noba K (2001). Flore et biodiversité végétale au Sénégal. *Sécheresse* 12: 149-155.

- Ba A, Plenchette C, Danthu P, Duponnois R, & Guissou T (2001). Functional compatibility of two arbuscular mycorrhizae with thirteen fruit trees in Senegal. *Agroforestry systems*.50 : 95-105.
- Bader J C, Piedelievre J P & Lamagat J P (2006). Seasonal forecasting of the flood volume of the Senegal River based on results of the ARPEGE Climate model. *Hydrological science journal*, 51 (3): 406-417.
- Bärtel A (1994). Guide des plantes tropicales : Plantes ornementales, plantes utiles, fruits exotiques : Edition française, 315. *Editions Eugen Ulmer, Paris*, 384 p.
- Baumer M (1995). Arbres, arbustes et arbrisseaux nourriciers en Afrique occidentale. *Enda Tiers-Monde, Dakar*.54 p.
- Beaumont L, Lesly H. & Pitman A (2008). Why is the choice of future climate scenarios for species distribution modelling important? *Ecology Letters* 11: 1135–1146.
- Blum A (2005). Drought resistance, water-use efficiency, and yield potential-are they compatible, dissonant, or mutually exclusive? *Aust. J. Agric. Res.*, 56: 1159-1168.
- Boffa J (1995). Productivity and Management of Agroforestry Parklands in the Sudan Zone of Burkina Faso, West Africa. *PhD Thesis, Purdue University, Indiana USA*, 233 p.
- Boffa J (1999). Vers une approche régionale des ressources génétiques forestières en Afrique subsaharienne. Actes du premier atelier de formation sur la conservation et l'utilisation durable des ressources génétiques forestières en Afrique de l'Ouest, Afrique centrale et Madagascar. *Centre National de Semences Forestières, Ouagadougou 16 au 27 mars 1998*. 23-39.
- Boko M, Niang I, Nyong A, Vogel C, Githeko A, Medany M, Osman-Lasha B, Tabo R & Yanda P (2007). Africa. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. *Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Parry, M. L., Canziani, O. F., Palutikof, J. P., Van Der Linden, P. J. & Hanson, C. E., (ed.). *Cambridge University Press. Cambridge UK*, 433-467.
- Bouamri R, Dalpé Y, Serrhini M & Bennani A (2006). Arbuscular mycorrhizal fungi species associated with rhizosphere of *Phoenix dactylifera* L, in Morocco, *African Journal of Biotechnology*, 5: 510-516.

- Bourou S, Ndiaye F, Diouf M & Van Damme P (2010). Tamarind (*Tamarindus indica* L.) parkland mycorrhizal potential within three agro-ecological zones of Senegal. *Fruits*, 65: 1–9.
- Bowe C & Haq N (2010). Quantifying the global environmental niche of an underutilised tropical fruit tree (*Tamarindus indica* L.) using herbarium records. *Agriculture Ecosystem and the Environment*. 139: 51-58.
- Bowe C (2007). Predicting suitable areas for the production of tamarind (*Tamarindus indica* L.) an underutilised fruit tree species, *PhD Thesis, University of Southampton, Southampton, UK*, 230 p.
- Boyer J (1982). Plant productivity and environment, *Science* 2:18 443–448.
- Breman H, & Kessler J-J (1995). Le rôle des ligneux dans les agro-écosystèmes des régions semi-arides (avec un accent particulier sur les pays sahéliens) *Springer Verlag, Berlin*. 19 : 123-231
- Broadhead J, Ong C & Black C (2003). Tree phenology and water availability in semi-arid agroforestry systems. *Forest Ecology and Management*, 180: 61-73.
- Brundrett M (2002). Co-evolution of roots and mycorrhizas of land plants. *New Phyt.* 154, 275-304.
- Brundrett M (2004). Diversity and classification of mycorrhizal associations, *Biol. Rev.* 79, 473–495.
- Buchmann C, Prehler S, Hartl A & Vogl C (2009). To plant or Not to plant? Considering the cultural context of adoptive transplantation of baobab (*Adansonia digitata* L.) and tamarind (*Tamarindus indica* L.) in West Africa. Tropentag 2009, conference on international research on food security, natural resource management and rural development. *University of Hamburg*. 23 p.
- Buermann B, Saatchi S, Zutta B, Chaves J, Mila B, Graham C & Smith T (2008). Application of remote sensing data in predictive models of species' distribution. *Journal of Biogeography* 35: 1160–1176.
- Busby J (1991). BIOCLIM – A bioclimatic analysis and predictive system. In Margoles C. R. & Austin M. P. (ed.). *Nature Conservation: Cost Effective Biological Surveys and Data Analysis*, *CSIRO: Canberra* 64–68.
- Calvente R, Cano C, Ferrol N, Azcón-Aguilar C & Barea J (2004). Analysing natural diversity of arbuscular mycorrhizal fungi in olive tree (*Olea europaea* L.) plantations and assessment of the

effectiveness of native fungal isolates as inoculants for commercial cultivars of olive plantlets, *Applied Soil Ecology*, 26: 11-19.

Carter J M & Nippert J B (2012). Leaf-level physiological responses of *Tamarix ramosissima* to increasing salinity. *Journal of arid environments*, 77: 17-24.

Castillo O S, Dasgupta-Schubert C J A N, Zaragoza E M & Villegas H J (2011). The effect of the symbiosis between *Tagetes erecta* L. (marigold) and *Glomus intraradices* in the uptake of Copper (II) and its implications for phytoremediation. *New Biotechnology*, 29(1) : 156-164.

Cayenne E E & Scott R A (2011). Vegetation recovery in a desert landscape after wildfires: influences of community type, time since fire and contingency effects. *Journal of Applied Ecology*, 48, 1401–1410

Chaves M & Oliveira M (2004). Mechanisms underlying plant resilience to water deficit : prospects for water-saving agriculture. *J. Epx. Bot.*, 55: 2365-2384.

Christensen J, Hewitson B, Busuioc A, Chen A, Gao X, Held I, Jones R, Kolli K, Kwon W-T, Laprise R, Magaña-Rueda V, Mearns L, Menéndez G, Räisänen J, Rinke A, Sarr A & Whetton P (2007). Regional Climate Projections. In Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K. B., Tignor, M. & Miller, H. (ed.). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 310 p.

Colard A, Corradi N & Sanders I R (2007). Do AMF harbour meiosis-specific genes in their genome ? *Biology07. The Annual Meeting of the Swiss Zoological, Botanical and Mycological societies*. Zurich, Switzerland: ETH, 27 p.

Conedera M, Bomio-Pacciorini N, Bomio-Pacciorini P, Sciacca S, Grandi L, Boureima A & Vettraino A M (2010). Restoring degraded ecosystem in the Sahel. *Bois et forêt des tropiques*, 304: 61-71.

Corradi N, Croll D, Colard A, Kuhn G, Ehinger M & Sanders I (2007). Gene copy number polymorphisms in an arbuscular mycorrhizal fungal population. *Applied and Environmental Microbiology* 73: 366-369.

Costa-França M, Pham Thi A, Pimentel C, Pereyra-Rossiello R, Zuily-Fodil Y & Laffray D (2000). Differences in growth and water relation among *Phaseolus vulgaris* cultivars in response to induced drought stress. *Environmental and Experimental Botany* 43: 227-337.

Craven D, Dent D, Braden D, Ashton M S, Berlyn G P & Hall J S (2011). Seasonal variability of photosynthetic characteristics influences growth of eight tropical tree species at two sites with contrasting precipitation in Panama. *Forest ecology and management*, 261 (10): 1643-1653.

Dalpe Y & Declerck S (2002). Development of *Acaulospora rehmi* spore and hyphal swellings under root-organ culture. *Mycologia*, 94 : 850-855.

Dalpe Y (1998). Biodiversity of mycorrhizal fungi. *Electronic publication prepared for the Review of biodiversity in the Canadian agricultural soils*, 34-53.

Danthu P, Gaye A, Roussel L & Sarr A (1996). Long term conservation of seed pretreated by sulfuric acid. *In Innovations in tropical tree seed technology, Danida Forest Seed Centre, Humlebaek*, 37-44.

Davies Jr., Potter Jr & Linderman R (1993). Drought resistance of mycorrhizal pepper plants independent of leaf concentration response in gas exchange and water relations. *Plant physiology*. 87: 45-53.

Dawson I, Lengkeek A, Weber J & Jamnadass R (2009). Managing genetic variation in tropical trees: linking knowledge with action in agroforestry ecosystems for improved conservation and enhanced livelihoods. *Biodiversity Conservation* 18: 969–986.

De Caluwé E, Halamova K & Van Damme P (2010). *Tamarindus indica* L. A Review of Traditional Uses, *Phytochemistry and Pharmacology*, 38 p.

Deblonde P & Ledent J F (2000). Effects of moderate drought conditions on crop growth parameters and earliness of six potato cultivars under field conditions. *Agronomie*, 20 : 595-608.

Déziel M-H (2000). Influence de l'inoculation endomycorhizienne au champ sur le rendement et la qualité de la pomme de terre (*Solanum tuberosum* L.). Université de Laval, Canada, *mémoire de Master of Science*, 112 p.

Diagne A L (2000). Impact d'un déficit pluviométrique sur le fonctionnement hydrique foliaire de *Acacia tortilis* en zone semi-aride (Ferlo-Nord, Sénégal). Doctorat de troisième cycle en science de l'environnement, *Université Cheikh Anta Diop de Dakar (UCAD)*, Dakar , 38 p.

Diallo A T (1998). Contribution à l'étude taxonomique et écologique des Glomales et de l'influence de la mycorhization avec *Glomus mosseae* et *Glomus versiforme* sur la croissance et la productivité du niébé, *Vigna unguiculata* (L.) Walp. cultivé en condition de déficit hydrique. *Thèse de doctorat de 3ème cycle de Biologie végétale, UCAD*, 113 p.

Diallo B O (2001). Biologie de la reproduction et Evaluation de la diversité génétique chez une légumineuse : *Tamarindus indica* L. (Caesalpinioideae). *Thèse Université Montpellier II. Science et Technique du Languedoc*, 119 p.

Diallo B, Joly H, Mckey D, Hossaertmckey M & Chevallier M-H (2007). Genetic diversity of *Tamarindus indica* L. populations: any clues on the origin from its current distribution? *African Journal of Biotechnology* 6: 853-860.

Diallo B, Mckey D, Chevallier M-H, Joly H, & Hossaert-Mckey M (2008). Breeding system and pollination biology of the semi-domesticated fruit tree, *Tamarindus indica* L, (Leguminosae: Caesalpinioideae): Implications for fruit production, selective breeding, and conservation of genetic resources, *African Journal of Biotechnology*, 7: 4068-4075.

Diouf M (1996). Etude du fonctionnement hydrique et des réponses à l'aridité des ligneux sahéliens cas de *Acacia tortilis* (Forssk.) Hayne subsp. *raddiana* (Savi) Brenan en zone soudano-sahélienne du Sénégal. *Doctorat de 3ème cycle de Biologie végétale, Université Cheikh Anta Diop de Dakar (UCAD)*, Dakar, 297 p.

Dramé H (2002). Organisations paysannes et développement agricole durable en Casamance (Sénégal). *ONG Plein Sud (France)*, Dakar, 47 p.

Dramé K N (2005). Réponses adaptatives de l'arachide aux contraintes environnementales : Caractérisation d'un nouvel inhibiteur de sérine protéinase. *Thèse de doctorat, Université Paris XII-Val De Marne-France*, 144 p.

Ducouso M (1991). Importance des symbioses racinaires pour l'utilisation des Acacias d'Afrique de l'Ouest. *Thèse d'Université Claude-Bernard de Lyon, France* 205 p.

Ducouso M, Bourgeois C, Buyck B, Eyssartier G, Vincelette M, Rabevohitra R, Béna G, Randrihasipara L, Drefus B & Prin Y (2004). The last common ancestor of Sarcolaenaceae and Asian dipterocarp trees was ectomycorrhizal before the India-Madagascar separation, about 88 million years ago. *Molecular Ecology*, 13: 231-236.

Echairi A, Nouaim R & Chaussod R (2008). Intérêt de la mycorhization contrôlée pour la production de plants d'arganier (*Argania spinosa*) en conditions de pépinière. *Sécheresse*, 19 (4) : 277-81.

Elith J, Graham H C, Anderson P, Dudik M, Ferrier S, Guisan A, Hijmans J, Huettmann F, Leathwick R, Lehmann A, Li J, Lohmann G, Loiselle A, Manion G, Moritz C, Nakamura M, Nakazawa Y, Overton Mc C, Townsend P, Phillips J, Richardson K, Scachetti-Pereira R, Schapire E, Soberon J, Williams S, Wisz S M & Zimmermann E (2006). Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data. *Ecography*, 29: 129-151.

El-Siddig K, Gunasena H, Prasad B, Pushpakumara D , Ramana K, Vijayand P & Williams J (2006). Tamarind (*Tamarindus indica* L.), *British Library, Southampton, Southampton Centre for Underutilised Crops*, UK. 210 p.

Emori S, Nozawa T, Abe-Ouchi A, Numaguti A, Kimoto M, & Nakajima T (1999). Coupled ocean-atmosphere model experiments of future climate change with an explicit representation of sulfate aerosol scattering. *J.Meteor. Soc. Japan*, 188 316-319.

Escudero A, Delarco J & Garrido M (1992). The efficiency of nitrogen retranslocation from leaf biomass in *Quercus ilex* ecosystems, *Vegetation*, 100: 225-237.

Estrada-Pena A, Corson M, Venzal J, Mangold A & Guglielmone A (2006). Climate and changes in the habitat suitability for the cattle tick *Boophilus microplus* in its southern Neotropical distribution range. *Journal of Vector Ecology*, 31, 158-167.

Eyog Matig O & Dreyer E (1991). Fonctionnement hydrique de quatre essences de reboisement au Nord-Cameroun: évolution saisonnière du potentiel hydrique et de la conductance stomatique. *Actes du Séminaire "Physiologie des arbres et arbustes des zones arides"* Nancy, 27 mars-6 avril. 26 p.

Falalou H (2006). Paramètres physiologiques, biochimiques et agronomiques pertinents pour les programmes d'amélioration de l'adaptation du niébé (*Vigna unguiculata* L. WALP.) au déficit hydrique. *Thèse de doctorat, université de Ouagadougou, Burkina-Faso*, 172 p.

Fandohan A, Assogbadjo A, Glèlèlè R, Sinsin B & Van Damme P (2010). Impact of habitat type on the conservation status of tamarind (*Tamarindus indica* L.) populations in the National Park of Benin. *Fruits* 65:11–19.

FAO (2008). Perspectives agricoles de l'OCDE et de la FAO 2008-2017, OCDE/FAO, 83 p.

FAOSTAT (2005). Données FAOSTAT 2005. <http://www.faostat.fao.org>

Fernando E, Vega F E, simpkins A, Aime M C, Posada F, Peterson S W, Rehner S A, Infante F, Castillo A & Amold A E (2010). Fungal endophyte diversity in coffee plants from Colombia, Hawaiï, Mexico and Puerto Rico. *Fungal Ecology*, 3 (3): 122-138.

Flato G M & Boer G J (2001). Warming Asymmetry in Climate Change Simulations. *Geophys. Res. Lett.*, 28, 195-198.

Fournier C (1995). Fonctionnement hydrique de six espèces ligneuses coexistant dans une savane sahélienne (région du Ferlo, nord Sénégal). *Thèse de doctorat, université de Paris* 169 p.

Gao Y Z, Giese M, Han X G, Wang D L, Zhou Z Y, Bueck H, Lin S & Taube F (2009). Land uses and drought interactively affect interspecific competition and species diversity at the local scale in a semiarid steppe ecosystem. *Ecological Research*, 24 (3): 627-635.

GDAM (2009). Senegal Administrative boundries Global Administrative Areas, Version 1.0 (*extracted GADM version 1.0 in March 2009*) <http://www.gadm.org>

Gonzalez P (2001). Desertification and a shift of forest species in the West African Sahel. *Climate research* 17 : 217-228.

Gordon C, Cooper C, Senior C A, Banks H T, Gregory J M, Johns T C, Mitchell J F B & Wood RA (2000). The simulation of SST, sea ice extents and ocean heat transports in a version of the Hadley Centre coupled model without flux adjustments. *Clim. Dyn.*, 16: 147-168.

Granier A & Colin F, (1990). Effets d'une sécheresse édaphique sur le fonctionnement hydrique d'*Abies bornmulleriana* en conditions naturelles. *Ann. Sci. For.* 47: 189-200.

Grollier C, Debien C, Dornier M, & Reynes M (1998). Principales caractéristiques et voies de valorisation du tamarin. *Fruits* 53: 271-280.

- Grouzis M & Akpo L (2006). Interaction arbre-herbe au Sahel, *Sécheresse*, 17 : 318-325.
- Grouzis M & Nizinski J (1991). L'arbre et l'herbe au Sahel. Influence de l'arbre sur la structure spécifique et la productivité de la strate herbacée, et sur la régénération des espèces ligneuses in : *Actes du quatrième Congrès & International des Terres de Parcours*, Montpellier, France, 22-26 avril, 2 : 207-210.
- Grouzis M & Sicot M (1980). A method for the phenological study of browse population in the Sahel: the influence of some ecological factors in. *Browse in Africa*. Le Houérou HN (Ed). *ILCA, Addis-Ababa*, 233-240.
- Grovel R (1993). Le tamarinier *Tamarindus indica* L. (Caesalpiniciacées). *Flamboyant* 27, 33-35.
- Guisan A & Zimmermann N (2000). Predictive habitat distribution models in ecology. *Ecological Modelling*, 135: 147-186.
- Guisso T (2009). Contribution of arbuscular mycorrhizal fungi to growth and nutrient uptake by jujube and tamarind seedlings in a phosphate (P)-deficient soil, *African Journal of Microbiology Research*, 3: 297-304.
- Guisso T, Ba A, Planchette C, Guinko S & Duponnois R (2001). Effets des mycorhizes à arbuscules sur la tolérance à un stress hydrique chez quatre arbres fruitiers *Balanites aegyptiaca* (L.) Del., *Parkia biglobosa* (Jacq.) Benth., *Tamarindus indica* L. et *Ziziphus mauritiana* Lam. *Sécheresse*, 12: 121-127.
- Hall A E (2004). Breeding for adaptation to drought and heat in cowpea. *European J. Agronomy*, 21 : 447-454.
- Harisson P (1991). Une Afrique verte. *CTA, Paris*, 49 p.
- Harley J L & Smith S E (1983). Mycorrhizal Symbiosis. *Academic Press, London*, 36 p.
- Havinga M, Hartl A, Puttscher J, Prehsler S, Buchmann C & Vogl C R (2010). *Tamarindus indica* L. (Fabaceae): Patterns of use in traditional African medicine. *Journal of Ethnopharmacology*, 127: 1872-7573.

- Heijden M, Klironomos J, Ursic M, Moutoglou P, Streitwolf-Engel R, Boller T, Wiemken A & Sanders I (1998). Mycorrhizal fungal diversity determines plant biodiversity, ecosystem variability and productivity. *Nature*, 396: 69-72.
- Hijmans R J & Graham C H (2006). The ability of climate envelope models to predict the effect of climate change on species distributions. *Global Change Biology*, 12: 2272–2281.
- Hijmans R, Cameron S, Parra J, Jones P & Jarvis A (2005). The WorldClim interpolated global terrestrial climate surfaces. *Version 1.3*. <http://biogeo.berkeley.edu>
- Hirst A C, Gordon H B & O'farrell S P (1996). Global warming in a coupled climate model including oceanic eddy-induced advection. *Geophysical Research Letters*, 23 : 3361-3364.
- Hirst A C, O'farrell, S P & Gordon H B (1999). Comparison of a coupled ocean-atmosphere model with and without oceanic eddy-induced advection. Ocean spin-up and control integrations. *J. Climate* 211: 186-201.
- Hodge A, Helgason T & Fitter H (2010). Nutritional ecology of arbuscular mycorrhizal fungi. *Fungal Ecology*, 3 (4): 267-273.
- Hoff C & Rambal S (2003). An examination of the interaction between climate, soil and leaf area index in a *Quercus ilex* ecosystem, *Annals of Forest Science*, 60: 153-161.
- ISNAR (1996). Survivre au Sahel, un défi pour l'écologie et la politique de développement. *Leisinger K.M., Schmitt K. (eds.), ISBN 92-9118-027-0, 232 p.*
- Jacques D, Zerbo G C, Soloviev P & Lompo D (2010). *Acacia Senegal* in Burkina Faso: a genetic improvement strategy. *Bois et forêts des tropiques*, 34 : 35-45.
- James T, Kauff F, Schoch C, Matheny P, Hofstetter V, Cox C, Celio G, Gueidan C, Fraker E & Miadlikowska (2006). Reconstructing the early evolution of the fungi using a six gene phylogeny. *Nature*, 443: 818-822.
- Jansa J, Mozafar A, Anken T, Ruh R, Sanders I R & Frossard E (2002). Diversity and structure of AMF communities as affected by tillage in a temperate soil, *Mycorrhiza*, 12, 225–234.

Kasraoui F, Braham M, Denden M, Mehri H, Garcia M, Lamaze T & Attia F (2005). Effet du déficit hydrique au niveau de la phase photochimique du PSII chez deux variétés d'olivier. *Comptes rendus Biologies*, 329 : 98-105.

Khalifaoui J L (1995). Conduite de l'amélioration génétique de l'adaptation à la sécheresse en fonction de ses mécanismes physiologiques. *Oléagineux*, 40 : 35-44.

Kizito F, Dragila M, Sène M, Lufafa A, Diedhiou I, Dick R, Selker J, Dossa E, Khouma M, Badiane A, Ndiaye S (2006). Seasonal soil water variation and root patterns between two semi-arid shrubs co-existing with Pearl millet in Senegal, West Africa. *Journal of Arid Environments*, 67: 436–455.

Kizito F, Sène M, Dragila M, Lufafa A, Diedhiou I, Dossa E, Cuenca R, Selker J & Dick R (2007). Soil water balance of annual crop–native shrub systems in Senegal's Peanut Basin: The missing link, *Agricultural water management*, 90: 137-148.

Kouyaté A M (2005). Aspects ethnobotaniques et étude de la variabilité morphologique, biochimique et phénologique de *Detarium microcarpum* Gill. & Perr. au Mali, *Thèse de doctorat (PhD), université de Ghent, Belgique*, 207 p.

Lacape M J (1996). Effets de la sécheresse sur le cotonnier et amélioration de son adaptation au déficit hydrique. *Document de travail, CIRAD-CA*, 5: 35 p.

Lambers H, Brundrett M C, Raven J A & Hopper S D (2011). Plant mineral nutrition in ancient landscapes: high plant species diversity on infertile soils is linked to functional diversity for nutritional strategies. *Plant Soil*, 348:7–27.

Lande R, Engen S & Saether B-E (1997). Stochastic population dynamic in Ecology and conservation. *Oxford university Press ed. Oxford university Press*, London, 423 p.

Le Houerou H (1979). Climate, flora and fauna changes in the Sahara over the past 500 million years, *Journal of Arid Environments*, 37: 619-647.

Le Houerou H (1997). Climate, flora and fauna changes in the Sahara over the past 500 million years. *Journal of Arid Environments*, 37 : 619-647.

- Le Maire G, Marsden C, Verhoef W, Ponzoni F, Seen D, Bégué A, Stape J-L & Nouvellon Y (2011). Leaf area index estimation with MODIS reflectance time series and model inversion during full rotations of *Eucalyptus* plantations. *Remote Sensing of Environment*, 115: 586-599.
- Lekberg Y, Koide R, Rohr J, Aldrich-Wolfe L & Morton J (2007). Role of niche restrictions and dispersal in the composition of arbuscular mycorrhizal fungal communities. *Journal of ecology*, 95 : 95-105.
- Leye E H M, Ndiaye M, Ndiaye F, Diallo B, Sarr A S, Diouf M & Diop T (2009). Effet de la mycorrhization sur la croissance et le développement de *Jatropha curcas* L. *Revue des Energies Renouvelables Vol. 12 N°2 (2009) 269 – 278*.
- Liu C, Berry P, Dawson T & Pearson R (2005). Selecting thresholds of occurrence in the prediction of species distribution. *Ecography*, 2: 385-393.
- Lobell D, Marshall B, Burke Tebaldi C, Mastrandrea M, Falcon W & Naylor R (2008). Prioritizing Climate Change Adaptation Needs for Food Security in 2030. *Science*, 319 : 607–610.
- Logan K, Brunsell N, Jones A R & Feddema J (2010). Assessing spatiotemporal variability of drought in the U.S. central plains. *Journal of Arid Environments*, 74 : 247–255.
- Lufafa A, Bolte J, Wright D, Khouma M, Diedhiou I, Dick R P, Kizito F, Dossa E & Noller J S (2008). Regional carbon stocks and dynamics in native woody shrub communities of Senegal's Peanut Basin. *Agriculture ecosystem & environment*, 128 (12): 1-11.
- Lumbres R I C, Lee Y J & Seo, Y O (2012). Development of height-Dbh growth model and biomass estimation of *Pinus kesiya* Royle ex Gordon in La Trinidad, Benguet, Philippines. *Asia life sciences*, 21 (1): 177-188.
- Lumbres R I C, Seo Y O, Kim S Y, Jang M, Pyo J K & Lee Y J (2012). Comparative analysis of nonlinear height-Dbh models for *Quercus* species in South Korea. *Asia life sciences*, 21 (1): 39-55.
- Maes WH, Achten W M J, Reubens B, Raes D, Samson R & Muys B (2009). Plant–water relationships and growth strategies of *Jatropha curcas* L. seedlings under different levels of drought stress, *Journal of Arid Environments*, 73: 877–884.
- Magnani F, Grace J & Borghetti M (2002). Adjustment of tree structure in response to the environment under hydraulic constraints, *Functional Ecology*, 16: 385-393.

Maksoud M, Haggag L, Azzay M & Saad R (1994). Effect of VAM inoculation and phosphorous application on growth and nutrient content (P and K) of *Tamarindus indica* L. (Tamarind) seedlings, *Ann. Agric. Sci.*, 30 : 355–363.

Manga A B (2005). Biodiversité des champignons mycorhiziens arbusculaires d'*Acacia seyal* Del. et évaluation de leurs potentialités symbiotiques en milieu salé. *Thèse de Doctorat de 3^{ème} cycle, Université Cheikh Anta Diop, Dakar*, 118 p.

Manoharachary C, Kunwar C, Tilak K V B R & Adeholey A (2010). Arbuscular mycorrhizal fungi-taxonomy, diversity, conservation and multiplication. *Proceedings of National Academy of Sciences India section B-Biological Sciences*, 80: 1-13.

Maranz S (2009). Tree mortality in the African Sahel indicates an anthropogenic ecosystem displaced by climate change. *Journal of Biogeography*, 36: 1181–1193.

Mardukhi B, Rejali F, Daei G, Ardakani R, Malakouti M & Miransari M (2011). Arbuscular mycorrhizas enhance nutrient uptake in different wheat genotypes at high salinity levels under field and greenhouse conditions. *C. R. Biologies*, 334: 564–571.

McMillen B, Juniper S, & Abbot L (1998). Inhibition of hyphal growth of a VA mycorrhizal fungus in soil containing sodium chloride limits the spread of infection from spores, *Soil Biology and Biochemistry*, 30: 1639-1646.

Meddich A, Oihabi A, Bizid E, & El hadrami I (2004). Rôle des champignons mycorhiziens VA dans la tolérance du palmier dattier (*Phoenix dactylifera*) au déficit hydrique. *Revue des régions arides*, 2: 640-646.

Meehl G, Stocker T, Collins W, Friedlingstein P, Gaye A, Gregory J, Kitoh A, Knutti R, Murphy J, Noda A, Raper S, Watterson I, Weaver A & Zhao Z-C (2007). Global Climate Projections. In Solomon, S. D., Qin, Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K. B., Tignor, M. & Miller, H.L. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 298 p.

Meinzer F C (2003). Functional convergence in plant responses to the environment, *Oecologia*, 134: 1-11.

- Mencuccini M (2002). Hydraulic constraints in the functional scaling of trees, *Tree physiology*, 22: 553-565.
- Mendham D S, White D A, Battaglia M, McGrath J F, Short T M, Ogden G N & Kinal J (2011). Soil water depletion and replenishment during first- and early second-rotation *Eucalyptus globulus* plantations with deep soil profiles. *Agriculture and forest meteorology*, 51 (12): 1568-1579.
- Miller R M & Jastrow J D (1992). The application of VA mycorrhizae to ecosystem restoration and reclamation (p. 438-467). In M. F. Allan (ed) *Mycorrhiza functioning Routledge*, Chapman and Hall, New York, 321 p.
- MINEP (*Ministère de l'Environnement et la Protection de la nature*) (2006). Vers un Plan d'Action National décennal sur les Modes de Production et de Consommation Durables au Sénégal, Dakar, *République du Sénégal*, 62 p.
- Mohino E, Rodriguez-Fonseca B, Losada T, Gervois S, Janicot S, Bader J; Ruti P & Chauvin F (2011). Changes in the interannual SST-forced signals on West African rainfall. AGCM intercomparison. *Climate dynamics*, 37 (9-10) : 1707-172.
- Moiwo J, TAO F & Lu W (2011). Estimating soil moisture storage change using quasi-terrestrial water balance method. *Agricultural Water Management*, 102: 25– 34.
- Mojeremane W & Tshwenyane S O (2004). *Azanza garckeana*: A valuable edible indigenous fruit tree of Botswana. *Pak. J. Nutr.*, 3: 264-267.
- Morton J (1987). Tamarind (*Tamarindus indica*), in: Fruits of warm climates, Julia F. Morton, *Miami*, FL, U.S.A., 115–121.
- Nakicenovic N, Davidson O, Davis G, Grubler A, Kram T, Larovere E, Metz B, Morita T, Pepper W & Pitcher H (2009). IPCC Special Report on Emission Scenarios, *Cambridge University Press*, Cambridge, UK and New York, USA, 599 p.
- Ndiaye S, Wade M & Coulibaly H (2002). Contribution à la caractérisation des peuplements de cinq fruitiers sahéliens prioritaires : *Adansonia digitata*, *Parkia biglobasa*, *Tamarindus indica*, *Vitellaria paradoxa* et *Ziziphus mauritaiana*. *CNRF: RESEAU CORAF FORET / AGROFORESTERIE*, Dakar (Sénégal) 28 p.

- Nwalozie M & Annerose D (1996). Stomatal behaviour and water status of cowpea and peanut at low soil moisture levels. *Acta Agronomica Hungarica*, 44: 229-236.
- Nyadoi P (2005). Population Structure and Socio-Economic Importance of *Tamarindus indica* in Tharaka District, Eastern Kenya. M.Sc. Thesis. Makerere University, Uganda, 110 p.
- Olivier F & Wotherspoon S (2005). Modelling habitat selection using presence-only data: Case study of colonial hallow nesting bird, the snow petrel. *Ecological Modelling*, 213-232.
- Osborne P E & Leitao P J (2009). Effects of species and habitat positional errors on the performance and interpretation of species distribution models. *Diversity and Distributions*, 15 : 671-681.
- Ouédraogo S (2005). Intensification de l'agriculture dans le plateau central du Burkina Faso : une analyse des possibilités à partir des nouvelles technologies. *Thèse Doct., Univ. Groningen*, 336 p.
- PAM (2003). Insécurité et dangers alimentaires. Rapport d'activités. *Programme Alimentaire Mondiale, Rome (Italie)*. 259 p.
- Pang J Y, Yang J Y, Ward P, Siddique K H M, Lambers H & Ryan M (2011). Contrasting responses to drought stress in herbaceous perennial legumes. *Plant and Soil*. 348 (1-2): 299-314.
- Pataki D, Oren R, & Smith W (2000). Sap flux of co-occurring species in a western subalpine forest during seasonal soil drought, *Ecology*, 81: 2557-2566.
- Peterson A T & Holt R D (2003). Niche differentiation in Mexican birds: Using point occurrences to detect ecological innovation. *Ecology Letters*, 6:774-782.
- Peterson A, Soberon J & Sanchez-Cordero V (1999). Conservatism of Ecological Niches in Evolutionary Time. *Science*, 285: 1265 – 1267.
- Pham Thi A, Viera Da S & Mazliak P (1990). The role of membrane lipids in plant resistance to water stress. *Bull. Soc. Bot. Fr.*, 137: 99-114.
- Phillips S & Dudik M (2008). Modeling of species distributions with Maxent: new extensions and a comprehensive evaluation. *Ecography*, 31: 161-175.

- Phillips S, Anderson R & Schapire R (2006). Maximum entropy modeling species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190: 231-259.
- Pirozynski K A & Dalpé Y (1989). The geological history of the Glomaceae with particular reference to mycorrhizal symbiosis. *Symbiosis*, 7: 1-36.
- Pope V, Gallani M L, Rowntree P R & Stratton R A (2000). The impact of new physical parameterizations in the Hadley Centre climate model: HadAM3. *Clim Dyn* 16: 123-146
- Porcel R & Ruiz-Lozano J M (2004). Arbuscular mycorrhizal influence on leaf water potential, solute accumulation, and oxidative stress in soybean plants subjected to drought stress. *Journal of Experimental Botany* , 55 : 1743-1750.
- Poupon H (1979). Etude de la phénologie de la strate ligneuse 8 Fété-Olé (Sénégal septentrional) de 1971 à 1977. *Bulletin de ITFAN*, 41 : 44-85.
- Poupon H (1980). Structure et dynamique de la strate ligneuse d'une steppe sahéenne du Nord-Sénégal. Trav Doc, n°115, *ORSTOM, Paris*, 351 p.
- Poupon J & Chauvin G (1983). Les arbres de la Martinique, In ONF, ed. *Direction régionale pour la Martinique*. 256 p.
- Ramanankierana N, Ducouso M, Rakotoarimanga N, Prin Y, Thioulouse J, Randrianjohany E, Ramarosan L, Kisa M, Galiana A & Duponnois R (2007). Arbuscular mycorrhizas and ectomycorrhizas of *Uapaca bojeri* L. (Euphorbiaceae): sporophore diversity, patterns of root colonization, and effects on seedlings growth and soil microbial catabolic diversity. *Mycorrhiza*, 17 : 195-208.
- Rambal S, Ourcival J, Joffre R, Mouillot F, Nouvelon Y, Reichstein M & Rocheteau A (2003). Drought controls over conductance and assimilation of a Mediterranean evergreen ecosystem: scaling from leaf to canopy *Global Change Biology*, 9: 1-12.
- Ramirez & Jarvis (2010). Downscaling Global Circulation Model Outputs: The Delta Method. *Decision and Policy Analysis Working Paper N°1*. CIAT. 18 p.
- Ramos-Zapata J, Zapata-Trujillo R, Ortíz-Díaz J & Guadarrama P (2011). Arbuscular mycorrhizae in a tropical coastal dune system in Yucatan, Mexico. *Fungal ecology*, 4: 256-261.

Read D & Perez-Moreno J (2003). Mycorrhizas and nutrient cycling in ecosystems-a journey towards relevance ? *New phytologist*, 157 : 475-492.

Reichstein M, Tenhunen J, Rouspard O, Ourcival J, Rambal S, Miglietta F, Peressoti A, Pecchiari M, Tirone G & Valentini R (2002). Severe drought effects on ecosystem CO₂ and H₂O fluxes at three Mediterranean evergreen sites: revision of current hypotheses? *Global Change Biology*, 8: 999-1017.

Ribot J C (1999). A history of fear: imagining deforestation in the West African dryland forests. *Global Ecology and Biogeography*, 8 : 291-300.

Ribot J C (2007). Dans l'attente de la démocratie la politique des choix dans la décentralisation de la gestion des ressources naturelles. *World Resources Institute*, Washington (US), 23 p.

Rodriguez-Gamir J, Ancillo G, Aparicio F, Bordas M, Primo-Millo E & (2011). Water-deficit tolerance in citrus is mediated by the down regulation of PIP gene expression in the roots. *Plant and soil*. 347 (1-2): 91-104.

Romina G R & Chaverri P (2010). Diversity of fungal endophytes in leaves and stems of wild rubber trees (*Hevea brasiliensis*) in Peru. *Fungal Ecology*, 3 (3): 240-254.

Rosendahl S (2007). Communities, populations and individuals of arbuscular mycorrhizal fungi *New phytologist*, 178 : 253-266.

Rouhi V, Samson R, Lemeur R & Van Damme P (2007). Photosynthetic gas exchange characteristics in three different almond species during drought stress and subsequent recovery, *Environmental and Experimental Botany*, 59: 117-129.

Roussel M (2008). Variabilité intraspécifique de l'efficacité d'utilisation de l'eau dans une famille de chêne pédonculé (*Quercus robur* L.): causes physiologiques et/ou anatomiques, *Thèse de doctorat, université Henri Poincaré, Nancy I France*, 216 p.

Ruiz-Lozano J M & Azcón R (2000). Symbiotic efficiency and infectivity of an autochthonous arbuscular mycorrhizal *Glomus* sp. from saline soils and *Glomus deserticola* under salinity. *Mycorrhiza*, 10: 137-143.

- Ruiz-Lozano J, Azcón R & Gomez M (1995). Effects of arbuscular-mycorrhizal *Glomus* species on drought tolerance : physiological and nutritional plant responses. *Appl Environ Microbiol.*, 61: 456-460.
- Salack S, Muller B & Gaye A T (2011). Rain-based factors of high agricultural impacts over Senegal, Part I: Integration of local to sub-regional observed changes, *Journal of Theor, and appl, Clim*, 106: 1–22.
- Sanchez-Diaz M, Pardo M, Antolin M, Pena J & Aguirreolea J (1990). Effect of water stress on photosynthetic activity in the *Medicago-Rhizobium-Glomus symbiosis*. *Plant Science*, 71 : 215-221.
- Sarr B, Diagne M & Dancette C (2005). Le climat, in ISRA-ITA-CIRAD. (ed.). *Bilan de la recherche agricole et agroalimentaire au Sénégal*, Dakar, Sénégal, 33-50.
- Scheldeman X, Van Damme P, Romero Motoche J & Alvarez J V U (2006). Germplasm collection and fruit characterisation of cherimoya (*Annona cherimola* Mill.) in Loja Province, Ecuador, and important centre of biodiversity. *Belgian Journal of Botany*, 139, 27-38.
- Schmidt M, Thiombiano A, Zizka A, König K, Brunken U & Zizka G (2011). Patterns of plant functional traits in the biogeography of West African grasses (Poaceae). *African Journal of Ecology*, 49 (4): 490-500.
- Schreckenberg K (1996). Products of a managed landscape: non-timber forest products in the parklands of Benin. *Global Ecology and Biogeography Letters*, 8: 279–289.
- Schüßler A, Schwarzott D & Walker C (2001). A new fungal phylum, the Glomeromycota: phylogeny and evolution. *Myc. Res.*, 105: 1413-1421.
- Seghieri J (2010). Comparison of the measurements of leaf water potential between a hydraulic press and a pressure chamber in six Sahelian woody species. *Agroforestry system*, 80 (2): 185-190.
- Shamshiri M H, Mozafari V, Sedaghati E & Bagheri V (2011). Response of *Putenia* plants (*Petunia* hybrid cv. Mix) inoculated with *Glomus mosseae* and *Glomus intraradices* to Phosphorous and Drought Stress. *Journal of agricultural science and technonogy*, 13 (6): 929-942.
- Shepherd K, Ohlsson E, Okalebo J, Ndufa J & David S (1995). A static model of nutrient on mixed farms in the highlands of Western Kenya to explore the possible impact of improved management, in: Powell J M, Ferrandez-Rivera S, Williams T O, and Renard C (Eds), *Livestock and sustainable nutrient*

cycling in mixed farming systems of Sub-Sahara Africa, *International Livestock Centre for Africa*, Addis Ababa, Ethiopia, 425 p.

Sillett C, Van Pelt R, Koch W, Ambrose R, Carroll L, Antoine M & Mifsud B (2010). Increasing wood production through old age in tall trees. *Forest Ecology and Management*, 259: 976-994

Smith S E, Smith F A & Jakobsen I (2004). Functionnal diversity in arbuscular mycorrhizal (AM) symbioses : the contribution of the mycorrhizal P uptake pathway is not correlated with mycorrhizal responses in growth or total P uptake. *New phytologist*, 162 : 511-524.

Sop T K, Oldeland J, Schmiedel U, Ouedraogo I & Thiombiano A (2011). Population structure of three woody species in four domains of the sub-Sahel of Burkina Faso. *Land degradation and environment*, 22(6) : 519-529.

Sorrells M E, Diab A & Nachit M (2000). Comparative genetics of drought tolerance, in : Options méditerranéennes, Série A : Séminaires méditerranéens no 40, L'amélioration du blé dur dans la région méditerranéenne, *nouveaux défis*, 19-20.

Sperry J S (2000). Hydraulic constraints on plant gas exchange. *Agricultural and Forest Meteorology*, 104: 13-23.

Stokes C J, Howden S M, Moore A D, Jacobs B, Brown P R, Ash A, Kokic P & Leith P (2011). Managing Murray-Darling Basin livestock systems in a variable and changing climate: challenges and opportunities. *Rangeland Journal*, 32 (3): 293-304.

Strullu D & Plenchette C (1991). The entrapment of *Glomus* sp. In alginate beads and their use as root inoculum. *Mycol Res.*, 95: 1194-1196.

Sylvia D, Hammond L, Bennett J, Haas J & Linda S (1993). Field response of maize to a VAM fungus and water management. *Agronomy Journal*, 85: 193-8.

Taylor A & Alexander I (2005). The ectomycorrhizal symbiosis : life in the real world. *Mycologist*, 19 : 104-112.

Termote C, Van Damme P and Dhed'a Djailo B (2010a). Eating from the wild: Turumbu, Mbole and Bali traditional knowledge on non-cultivated edible plants, District Tshopo, DR Congo. *Genet Resour Crop Evol.*, 1-34.

- Termote C, Van Damme P and Dhed'a Djailo B (2010b). Eating from the Wild: Turumbu Indigenous Knowledge on Noncultivated Edible Plants, Tshopo District, and DR Congo. *Ecology of Food and Nutrition*, 49: 173–207.
- Thiam M, Atteynine S A; Traore S, Duplantier J-M, Maurel D & Sicard B (2011). Capacity for water conservation in invasive (*Gerbillus nigeriae*) and declining rodents (*Taterillus pygargus* and *Taterillus gracilis*) that exhibit climate-induced distribution changes in Senegal. *Journal of arid environments*, 75 (11): 998-1007.
- Traoré B (1978). Observations sur la phénologie de quelques espèces herbacées et ligneuses sahéliennes. A.C.C.-LAT (Haute-Volta), *DGRST/ORSTOM/ISP, Rapp. Multigr.*, Ouagadougou, 67 p.
- Tsané G, Fogain R, Achard R & Foko J (2005). Impact de la mycorhization arbusculaire sur la croissance de vitroplants de plantain, testée sur des sols de fertilité différente en conditions contrôlées au Cameroun, *Fruits*, 60 : 303-309.
- Turner N, Wright G & Siddique K 2001. Adaptation of grain legumes (Pulses) to water-limited environments. *Advances in Agr.*, 71: 193-231.
- Uhlmann E, Görke C, Petersen A & Oberwinkler F (2006). Arbuscular mycorrhizae from arid parts of Namibia, *J. Arid Environ.*, 64: 221–237.
- Ûlle P, Rosling A and Taylor A F S (2004). Ectomycorrhizal fungal communities associated with *Salix viminalis* L. and *S. dasyclados* Wimm, clones in a short-rotation forestry plantation, *Forest Ecology and Management*, 196: 413-424.
- UNCCD (2005). Afrique de l'ouest, troisième rapport sur la mise en œuvre de la convention pour combattre la désertification. <http://www.unccd.org/2005>
- Vallée G, M'brandon M & Forest F (1996). Semis direct dans l'aménagement de Sanguéré-Djalingo (Cameroun). *Cahiers Agricultures*, 5: 161-9.
- Van Horn B (2002). Approaches to habitat modelling: the tensions between pattern and process and between specificity and generality. In Scott, J.M., Heglund, P.J., Morrison, M.L., Haufler, J.B., Raphael, M.G., Wall, W.A. & Samson, F.B. (ed.). *Predicting Species Occurrences: Issues of Accuracy and Scale*. Island Press, Covelo, CA, 63–72.

- Vasiliauskas R, Mankis A, Finlay R & Stenlid J (2007). Wood-decay fungi in fine living roots of conifer seedlings. *New phytologist*, 174 : 441-446.
- Vasquez T A, Zuily-Fodil Y, Pham Thi A T & Da Silva V (1990). Electrolyte and Pi leakages and soluble sugars content as physiological tests for screening resistance to water stress in *Phaseolus* and *Vigna* species. *J. Epx. Bot.*, 228: 507-569.
- Vlek P, Lüttger A & Manske G (1996). The potential contribution of arbuscular mycorrhiza to the development of nutrient and water efficient wheat. In: The Ninth Regional Wheat Workshop for Eastern, Central and Southern Africa. Tanner, D.G., Payne, T.S., and Abdalla, O.S. (eds.). *Addis Ababa, Ethiopia: CIMMYT*, 28-46
- Von Maydell H J (1990). Arbres et arbustes du Sahel. Leurs caractéristiques et leurs utilisations. Version française pp 359-364. G.T.Z., *Eschborn*, 531 p.
- Walker C & Sanders F E (1986). Taxonomic concepts in the Endogonaceae: III. The separation of *Scutellospora* gen nov. From *Gigaspora* Gerd. & Trappe. *Mycotaxon* 27, 169-182.
- Walker C & Schüßler A (2004). Nomenclatural clarifications and new taxa in the Glomeromycota. *Mycol. Res.*, 108: 979-982.
- Walker C, Vestberg M, Demircik F, Stockinger H, Saito M, Sawaki H, Nishmura I and Schüssler A (2007). Molecular phylogeny and new taxa in the Archaeosporales (Glomeromycota) : *Ambispora fennica* gen. sp.nov., *Ambisporaceae* fam. nov., and amendment of *Archaeospora* and *Archaeosporaceae*. *Mycological Research*, 111 : 137-153.
- Wang Y, Vestberg M, Walker C, Hurmer T, Zhang X & Lindström K (2008). Diversity and infectivity of arbuscular mycorrhizal fungi in agricultural soils of the Sichuan Province of mainland China, *Mycorrhiza*, 18: 59-68.
- Waples R S & Gaggiotti O. (2006). What is a population ? An empirical evaluation of some genetic methods for identifying the number of gene pools and their degree of connectivity. *Molecular Ecology*, 15 : 1419-1439.

Willey E, McNyset K, Peterson T, Robin C & Stewart A (2003). Niche Modelling perspective on Geographic Range prediction in the Marine Environment using a Machine-learning Algorithm. *Oceanography*, 16: 120-127.

Wittig R, Konstantin K, Schmidt M & Szarzynski J (2007). A Study of Climate Change and Anthropogenic Impacts in West Africa. *Environmental Science Pollution Resources*, 14: 182–189.

Wright J, Machedo J & Smith A (1992). Drought acclimation among tropical forest shrubs (*Psychotria*, *Rubiaceae*). *Oecologia*., 89: 457-463.

Wubet T, Weiss M, Kottke I, Teketay D & Oberwinkler F (2004). Molecular diversity of arbuscular mycorrhizal fungi in *Prunus africana*, an endangered medicinal tree species in dry Afromontane forests of Ethiopia. *New Phytol.* 161: 517–528.

Wunderlin R P (1998). Guide to the vascular plants of Florida Gainesville : *University Press of Florida*, 806 p.

Yost A, Petersen S, Gregg M & Miller R (2008). Predictive modeling and mapping sage grouse (*Centrocercus urophasianus*) nesting habitat using Maximum Entropy and a long-term dataset from Southern Oregon. *Ecological Informatics*, 3 : 375-386.

Zhu Qian, Jiang H, Liu J X, Peng C H, Fang X Q, Yu S Q, Zhou G M, Wei XH & Ju W M (2011). Forecasting carbon budget under climate change and CO₂ fertilization for subtropical region in China using integrated biosphere simulator (IBIS) model. *Polish Journal of ecology*, 59 (1): 3-24.

Curriculum Vitae

Contacts :

*Institut de Recherche Agricole
pour le développement
Station Polyvalente
(IRAD) BP 415 – Garaoua
(Cameroon)*

SALI BOUROU

sali.bourou@gmail.com

00237 95 57 50 74/00237 78 58 07 94

État Civil :

- | | |
|---------------------------------|---|
| • Statut Familial : Marié | Ingénieur agronome (depuis 2000) |
| • Père de deux enfants | Chargé de recherche à l'Institut de Recherche Agricole pour le Développement (IRAD) |
| • Nationalité : Camerounais | Programme : Fruits (depuis 2002) |
| • Né le : 30 novembre 1973 | Coordination cultures pérennes |
| • A : Doubi – Guider (Cameroun) | |

Qualifications Professionnelles

Sali Bourou est un ingénieur agronome qui a fait ses études primaires (1980-1987) à l'école publique de Mayo-Loué (Guider, Cameroun). Les études secondaires s'en sont suivies de 1987 à 1995, sanctionnées par l'obtention du baccalauréat série « D » (mathématique et sciences biologiques) au lycée bilingue de Garoua (Cameroun). Il est dès lors admis sur concours à la faculté d'agronomie et des sciences agricoles de l'université de Dschang au Cameroun (1995-2000).

En 2002 il obtient un certificat d'études supérieures spécialisées (option adaptation des plantes au stress hydrique) au Centre d'Étude Régional pour l'Amélioration de l'Adaptation des plantes à la Sécheresse (CERAAS) de Thiès au Sénégal. La même année, il est recruté comme Attaché de Recherche à l'Institut de Recherche Agricole pour le Développement (IRAD) du Cameroun et bénéficie d'une bourse du gouvernement allemand (DAAD) pour effectuer son DEA (biologie végétale) à l'université Cheikh Anta Diop de Dakar (au Sénégal).

Depuis 2007, il a bénéficié d'une bourse du gouvernement allemand (DAAD) pour un programme de recherche doctorale, qui lui ouvre la porte d'intégrer l'équipe du projet DADOBAT (*Development and domestication of baobab and tamarind*) au CERAAS de Thiès au Sénégal. Il a ainsi été financé pour sa thèse par le projet DADOBAT-FP6-2004-INCO-DEV-3. Il effectue alors ses travaux au sein de l'équipe

du laboratoire d'ethnobotanique et d'agriculture subtropicale de l'université de Gand et en collaboration avec le CERAAS du Sénégal.

Il a par ailleurs participé à plusieurs congrès et symposiums internationaux et a bénéficié de plusieurs stages et formation en Afrique, Europe et Asie. Il est auteur ou co-auteur de 13 articles (à comité de lecture), proceedings, actes de colloques et rapports scientifiques.

LISTED DES PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES

❖ Articles parus dans des journaux avec comité de lecture

Article A1

- 1- **Bourou S.**, Bowe C., Diouf M & Van Damme P. (2012). Ecological and human impacts on stand density and distribution of tamarind (*Tamarindus indica* L.) in Senegal, *African Journal of Ecology*, doi:10.1111/j.1365-2028.2012.01319.x.
- 2- **Bourou S.**, Ndiaye F., Diouf M., Diop T. & Van Damme P. (2010). Tamarind (*Tamarindus indica* L.) parkland mycorrhizal potential within three agro-ecological zones of Senegal, *Fruits*, 2010, 65, 1–9.

3- Article A2

- 1- **Bourou S.**, Ndiaye F., Diouf M., & Van Damme P. (2011). Effets de l'inoculation mycorrhizienne sur le comportement agro-physiologique des écotypes du tamarinier (*Tamarindus indica*) au Sénégal, *Journal of Applied Biosciences* 46: 3093– 3102.
- 2- **Bourou S.** et Braconnier S. (2010). Effets du pré-trempage des graines sur le comportement agro-physiologique de deux variétés locales de niébé (*Vigna unguiculata* [L.] Walp.) en conditions d'alimentation hydrique variées. *Agronomie Africaine* 22 (1) 65-76.
- 3- Woin N., Volkmarb C., Djonmaïla, Wirnkar Lenzemo V., **Bourou S.**, and Bebom Noudji T. (2008). Evidence and population diversity of the Rice Yellow Mottle Virus (RYMV) insect vectors and some of their natural antagonists in paddy fields in the north of Cameroon. *Phytopathology and Plant Protection*, 1-12.

Proceedings et actes de colloques

- 1- **Bourou S.**, & Van Damme P. (2011). Density and distribution of (*Tamarindus indica* L.) in Senegal assessing a Sahel tree's potential to adapt to climate change. *Communication in agricultural and applied biological sciences*. Ghent University. 76 (1): 1-248.
- 2- Sorto M., Aboubakar Dandjouma A.K., Mbayabe L., Woin N., **Bourou S.**, Sougnabé S.N. (2009) Les pratiques de récolte, conditionnement, stockage et transport des fruits comme causes

des pertes post-récolte. Colloque 2009 PRASAC « Savanes Africaines en développement : Innover pour durer » 18 pp.

- 3- Sougnabé S.P., Woin N., Lyannaz J.P., **Bourou S.**, Sorto M., Amono J., Gandébé M., Bokossy N., Rey J-Y., Vannière H., Didier C., Gnemakando J., Dandjouma A., Mbayabé L. et Abdelkerim M. (2009). Caractérisation des bassins et des systèmes de production fruitière en zone de savanes d'Afrique Centrale. Colloque 2009 PRASAC « Savanes Africaines en développement : Innover pour durer » 13 pp.
- 4- Aboubakar Dandjouma AK., Sorto M., Mbayabe L., Woin N., **Bourou S.**, Gandebe M., Abdelkerim M. et Essang T. (2009). Commercialisation des fruits dans les savanes d'Afrique Centrale. Colloque 2009 PRASAC « Savanes Africaines en développement : Innover pour durer » 19 pp.
- 5- **Bourou S.**, Bowe C., Van Damme P. (2009). Density and distribution of tamarind (*Tamarindus indica* L.) in Senegal assessing a Sahel tree's potential to adapt to climate change. Congrès mondial de l'ICRAF, 23-28 août 2009 à Nairobi (Kenya), 76-77.

Rapports et mémoires

- 1- **Bourou S.**, (2004). Effets du pré-trempage des graines sur le comportement agro-physiologique chez deux variétés locales de niébé (*Vigna unguiculata* [L.] Walp.) en conditions d'alimentation hydrique variées, mémoire de DEA biologie végétale (option physiologie végétale), Faculté des sciences et techniques, Université Cheikh Anta Diop de Dakar (UCAD), Sénégal, 64 p.
- 2- **Bourou S.**, (2002). Études des mécanismes d'adaptation du cotonnier au stress hydrique, mémoire du CESS École National d'agronomie (ENSA)/Centre d'Étude Régional pour l'Amélioration de l'Adaptation à la Sécheresse (CERAAS)/Université Cheikh Anta Diop de Dakar (UCAD), Sénégal, 33 p.
- 3- **Bourou S.**, (2000). Perception paysanne et indicateurs biophysiques du niveau de fertilité des sols cultivés : cas du terroir de Mafa Kilda (Nord Cameroun, mémoire d'Ingénieur Agronome (Faculté d'Agronomie et des Sciences Agricoles). Université de Dschang, 72 p.

