



**COMMUNAUTE FRANCAISE DE BELGIQUE
ACADEMIE UNIVERSITAIRE WALLONIE-EUROPE
UNIVERSITE DE LIEGE (Ulg)
GEMBLoux AGRO BIO TECH (GxABT)**



**FIXATION DES DUNES DANS LE SUD-EST DU NIGER :
EVALUATION DE L'EFFICACITE DE LA BARRIERE MECANIQUE, ESPECES
LIGNEUSES ADAPTEES ET POTENTIALITES D'INOCULATION
MYCORHIZIENNE**

LAMINOu MANZO Ousmane

Dissertation originale présentée en vue de l'obtention du grade de
docteur en sciences agronomiques et ingénierie biologique

Promoteur : Pr PAUL Roger

2009

Copyright : Aux termes de la loi belge du 30 juin 1994, sur le droit d'auteur et les droits voisins, seul l'auteur a le droit de reproduire partiellement ou complètement cet ouvrage de quelque façon et forme que ce soit ou d'en autoriser la reproduction partielle ou complète de quelque manière et sous quelque forme que ce soit. Toute photocopie ou reproduction sous autre forme est donc faite en violation de la dite loi et de des modifications ultérieures.

LAMINOUM M. Ousmane. (2009). Fixation des dunes dans le Sud-est du Niger : Evaluation de l'efficacité de la barrière mécanique, espèces ligneuses adaptées et potentialités de l'inoculation mycorhizienne. Gembloux Agro Bio tech (Ulg), 142 p., 3 tabl., 30 fig.

Résumé : Le Sud-Est du Niger est soumis au phénomène d'érosion éolienne. Dans la zone de Gouré, les cuvettes oasiennes, principales sources de productions agricoles et de revenus, sont menacées de disparition à cause de l'ensablement. Des opérations de fixation de dunes sont entreprises pour sauver ce capital productif.

L'évaluation de la technique de fixation mécanique des dunes utilisée dans la zone a montré que celle-ci est efficace dans la restauration écologique du milieu. Trois années après la mise en place des palissades anti-érosives, à base des branchages de *Leptadenia pyrotechnica*, une végétation spontanée, comprenant 58 espèces (20 familles), dont 17 pérennes, s'était installée à l'intérieur du clayonnage, soit 42 espèces de plus que dans les zones non traitées. Au fil des ans, la composition floristique s'est progressivement stabilisée, témoignant ainsi d'une réduction notable des perturbations du milieu engendrées par l'action érosive des vents.

Dans une expérimentation de fixation biologique de dunes, sept espèces ligneuses, dont cinq autochtones (*Acacia senegal*, *A. tortilis*, *A. nilotica*, *Bauhinia rufescens*, *Balanites aegyptiaca*), et deux allochtones (*Prosopis juliflora* et *P. chilensis*) ont été testées.

En pépinière, les espèces ont subi un stress hydrique par interruption d'arrosage durant six jours. Les taux d'hydratation foliaire ont été déterminés, afin d'évaluer leur capacité respective à limiter les pertes d'eau par transpiration.

Dans un essai de terrain, les espèces ont été plantées sur un cordon dunaire, préfixé mécaniquement, en vue de tester leur aptitude à la stabilisation des dunes.

Les taux de survie sur trois années ont été calculés et la croissance en hauteur mesurée.

Les résultats en pépinière ont montré, qu'après six jours de stress hydrique, *Acacia senegal*, *A. tortilis*, *Prosopis chilensis* et *A. nilotica* sont les quatre espèces limitant le mieux les pertes en eau.

Les résultats sur site ont montré que la meilleure combinaison en matière de fixation de dunes dans cette zone serait d'associer l'espèce de *Prosopis chilensis* (fort taux de survie et croissance rapide) avec *A. tortilis* et/ou *A. nilotica* (survie et croissance relativement appréciables et intérêt économique plus important).

Dans l'optique d'un essai d'inoculation mycorhizienne, des échantillons de sols de Gouré ont été récoltés sous dix espèces ligneuses locales et exotiques, avec l'objectif d'identifier les différents types de champignons mycorhiziens à arbuscules (CMA) et de produire un inoculum indigène par le biais de trois plantes-pièges locales ; le mil, le sorgho et le niébé. Les résultats ont mis en évidence la présence de deux familles de Glomales dans les sols du département de Gouré, Glomaceae (appartenant au genre *Glomus*) et Gigasporaceae. Avec plus de 56 % des spores, le genre *Glomus* est le plus abondant des Glomales identifiées et aussi le plus viable (55,80 % des spores vivantes). La croissance en hauteur des parties aériennes du sorgho et du niébé a été significativement stimulée par l'inoculation. Les trois cultures sont équivalentes dans le piégeage des spores. Un inoculum mycorhizien composite de souches indigènes a été produit à partir de cette culture sporale.

L'efficacité de la mycorhization naturelle a été comparée à celles des apports de ce complexe mycorhizien indigène et du *Glomus intraradices*. Un substrat de culture naturel, non stérilisé, a été inoculé par le complexe mycorhizien de souches indigènes ou par du *Glomus intraradices*. Les effets de l'inoculation ont été observés sur cinq espèces ligneuses, dont trois *Acacias* (*A. nilotica*, *A. tortilis*, *A. senegal*), *Bauhinia rufescens* et *Prosopis chilensis*, en pépinière et en sol dunaire.

En pépinière, les espèces ont subi un stress hydrique par interruption d'arrosage durant six jours. Les taux d'hydratation foliaire ont été calculés, afin d'évaluer les effets de la mycorhization sur la limitation des pertes d'eau par transpiration.

Les différents taux de mycorhization ont été déterminés, ainsi que la croissance des plants et la production de la biomasse totale.

Dans un essai de terrain, les espèces inoculées et non inoculées ont été plantées sur un cordon dunaire, préfixé mécaniquement, en vue d'évaluer les effets des différents apports mycorhiziens au champ sur la croissance en hauteur des plants.

Les résultats en pépinière ont montré que (i) le sol de pépinière non stérilisé contient des CMA (champignon mycorhizien à arbuscules) endogènes aussi infectifs que les souches contrôlées ; (ii) l'apport du *Glomus intraradices* est efficace dans la stimulation de la production de biomasse totale et (iii) la mycorhization naturelle est quasi aussi efficace que les deux apports mycorhiziens dans la stimulation de la croissance en hauteur et dans la limitation de la perte d'eau des espèces par transpiration.

Les résultats sur site confirment l'efficacité comparable de la mycorhization naturelle et de celle des apports mycorhiziens.

Bien que l'effet du *G. intraradices* apparaisse être bénéfique en certains points chez quelques espèces, les effets observés ne justifient pas d'office de le préférer à l'inoculum composite de souches indigènes, ni à la mycorhization naturelle dans cette zone.

Mots-clés : clayonnage, dunes, fixation, mycorhizes, *Acacia senegal*, *A. tortilis*, *A. nilotica*, *Bauhinia rufescens*, *Balanites aegyptiaca*, *Prosopis juliflora*, *P. chilensis* et *Glomus intraradices*.

LAMINO M. Ousmane. (2009). Sand dunes stabilization in the Southeastern of Niger Republic: Assessment of the mechanical wind barrier effectiveness, adapted woody species and mycorrhizal inoculation potentialities. Gembloux, Belgium, Agro Bio tech (Ulg), 142 p., 3 tabl., 30 fig.

Summary: The Southeastern of Niger Republic is subjected to the phenomenon of wind erosion. In Gouré, the oasis basins, which are the main source of agricultural productions and incomes, are threatened to disappear because of the sand silting up. Operations of sand dunes fixation are taken to save this productive capital.

Assessment of the mechanical sand dunes fixation technique, used in this area, showed that this technique is effective in the ecological restoration of the environment. Three years after the implementation of the anti erosive fences, made of *Leptadenia pyrotechnica* branches, spontaneous floral vegetation, including 58 species (20 families) of which 17 perennials, had settled down inside the fences, owing 42 species more than in the untreated areas. Over the years, the floral composition gradually stabilized proving then a considerable reduction of the environmental disturbances caused by the erosive winds action.

In a biological sand dunes fixation experiment, seven woody species, of which five natives (*Acacia senegal*, *A. tortilis*, *A. nilotica*, *Bauhinia rufescens* and *Balanites aegyptiaca*) and two exotic (*Prosopis juliflora* and *P. chilensis*) have been tested in that zone of the Southeastern of Niger Republic.

In nursery, species underwent a water stress by interrupting the watering during six days. Foliar hydration has been determined in order to evaluate their capacity to limit water loss.

In a field experiment, species have been planted on a mechanically prefixed sand dune cord in order to test their ability in sand dunes stabilization.

Survival rates during the first three years have been calculated and height growth was measured.

In nursery, results showed that, after six days of water stress, *Acacia senegal*, *A. tortilis*, *P. chilensis* and *A. nilotica* are the four species limiting the best the losses in water.

Results on site showed that the best combination in sand dunes fixation, in this zone, would be the association of *Prosopis chilensis* specie (high survival rate and fast growth) with *A. tortilis* and/or *A. nilotica* (survival and growth relatively substantial and more important economic interest).

In the optics of a further mycorrhizal inoculation essay, soil samples from Gouré department were collected beneath ten mature native and exotic tree species in order to identify the types of associated arbuscular mycorrhizal (AM) fungi and to produce an indigenous inoculum by growing three local 'trap cultures' including millet, sorghum and cowpea. The results highlighted the presence of two families of Glomales in the soils including Glomaceae (belonging to the genus *Glomus*) and Gigasporaceae. With more than 56 % of spores, the genus *Glomus* is the most abundant of the identified Glomales and the most viable (55, 80 % of the live spores). The length growth of sorghum and cowpea plants was significantly stimulated by inoculation. The three 'trap cultures' species are equivalent in the spore's trapping. An indigenous mycorrhizal complex was produced from this spore culture.

Effects of the natural mycorrhization were compared with those of the addition of this indigenous mycorrhizal complex and *Glomus intraradices*. A natural unsterile culture substrate was inoculated with the indigenous inoculum or with *G. Intraradices*.

Inoculation effects were assessed on five woody species, among which three *Acacia*'s species (*A. nilotica*, *A. tortilis*, *A. senegal*), *Bauhinia rufescens* and *Prosopis chilensis*, in a tree nursery and on a sand dune of Gouré.

In the nursery, species underwent a water stress by interrupting the watering during six days. Foliar hydration has been determined in order to evaluate the respective effects of the mycorrhizal inoculation on the water loss limitation.

Mycorrhizal root colonization has been determined as well as plant height and total biomass.

In a field experiment, inoculated and non inoculated species have been planted on a mechanically prefixed sand dune portion in order to evaluate the effects of mycorrhizal inoculations on growth in the field.

Results in nursery showed that (i) the non sterile soil would contain some endogenous AMF (arbuscular mycorrhizal fungi) as infectious as those in soils with mycorrhizal additions; (ii) addition of *Glomus intraradices* would be efficient to stimulate total biomass and (iii) natural mycorrhization would be as efficient as both mycorrhizal addition in growth stimulation and water loss limitation by transpiration.

Results on site confirm the comparable effectiveness of the natural mycorrhization and mycorrhizal additions.

Although the addition of *G. intraradices* appears to be slightly superior by some aspects on some species, the observed effects do not justify preferring it, when compared to indigenous composite inoculum or to natural mycorrhization in this zone.

Key words: anti-erosive fences, Sand dunes, stabilization, mycorrhiza, *Acacia senegal*, *A. tortilis*, *A. nilotica*, *Bauhinia rufescens*, *Balanites aegyptiaca*, *Prosopis juliflora*, *P. Chilensis* and *Glomus intraradices*.

A mes chers regrettés parents
A mon épouse et mon fils A. Razak chéris
A mes frères et sœurs que j'aime beaucoup
A ma grande famille et tous mes amis
A tous les camarades avec qui nous avons vécu l'épisode 'REC-GOURE'

Remerciements

Au terme de ce travail, je tiens très sincèrement et du fond du cœur à remercier le professeur Roger Paul, responsable du Laboratoire de Toxicologie Environnementale de Gembloux Agro Bio Tech de l'Académie Wallonie-Europe, pour son encadrement très rapproché, sa très large disponibilité, sa patience, ses conseils précieux, son assistance permanente et multiforme, sa modestie et sa gentillesse paternelle dont il a fait preuve à mon égard tout le long de la réalisation de ce travail. Qu'il trouve ici le témoignage de mon éternelle reconnaissance et mon inestimable admiration. Merci professeur, vous serez dans mon cœur pour toujours.

J'adresse également mes remerciements au Dr Bruno Campanella du Laboratoire de Toxicologie Environnementale de Gembloux Agro Bio Tech de l'Académie Wallonie-Europe, pour sa disponibilité permanente à vérifier mes résultats, à relire et corriger mes écrits, à faire des suggestions d'amélioration ou m'éclairer sur tel ou tel autre aspect de mon travail, sa patience et sa compréhension à être intensément sollicité le long de ce travail. Grand merci à toi aussi, Petit Chef.

Ma grande reconnaissance au peuple belge qui, à travers la CUD, a financé le projet de Recherche sur l'Ensemblement des Cuvettes de Gouré (REC Gouré), projet dans lequel cette thèse a pu être réalisée.

Mes sincères remerciements vont également à mes professeurs du DES en « Gestion des Risques naturelles » et promoteurs du projet REC-Gouré, projet dans le cadre duquel ce travail a été réalisé. Il s'agit des professeurs R. Paul, A. Ozer, B. Tychon, C. Biolders et au docteur P. Ozer qui ont aussi bien voulu relire mon document.

Aux étudiants et stagiaires nigériens et belges ayant travaillé au sein du projet 'REC-Gouré', je vous dis 'Nagodé' pour votre sens de convivialité, de collaboration et aussi de votre amitié.

Mes remerciements vont aussi au Pr Christian Planchette pour ses enseignements sur les mycorhizes lors de ses fréquents déplacements sur Gembloux, ses multiples explications et conseils et aussi pour la lecture et vérification de mes principaux résultats statistiques. Merci Professeur.

Je n'oublierai pas Dr Tiby Guissou, du Burkina Faso, qui, au nom de la fraternité africaine, sans m'avoir jamais rencontré, a accepté de lire mes écrits et m'apporté des suggestions. Vos remarques et suggestions m'ont permis d'affiner ce présent document. Merci pour votre disponibilité et votre altruisme.

Je remercie aussi J-P. Baudoin, B. Campanella, M. Culot et J-L. Doucet de Gembloux Agro-Bio Tech, C. Bielders de l'Université Catholique de Louvain, P. Ozer et B. Tychon de l'Université de Liège d'avoir accepté d'être membres du jury de cette thèse de doctorat et de m'avoir aidé à affiner le présent document.

Aussi, je remercie Mme Marafa Dahiratou de l'Université de Niamey pour ses encouragements et sa précieuse collaboration dans la production de l'inoculum local utilisé dans ce travail.

Au Pr Ambouta Karimoune de la Faculté d'Agronomie de l'Université Abdou Moumouni de Niamey, je dis merci beaucoup. Sans votre compréhension et votre dévouement, ce travail ne serait pas tel car vous vous êtes investi corps et âme pour la réussite de nos travaux de terrain. Merci aussi pour vos conseils précieux et votre promptitude à lever le moindre obstacle à nos travaux sur le terrain.

Salamou Aleikum Wafi, toi l'ancien qui m'a initié aux mycorhizes, je te dis merci pour ta disponibilité, ton amitié fraternelle, tes conseils et ta compagnie dont je ne me lasse guère. Je suis très heureux de te retrouver au labo pour la finalisation de ta thèse.

Elke, je ne sais comment te remercier pour l'immense travail d'observations de mycorhizes que tu as abattu pour moi. Sans toi, sans ton expérience et ton aide mes observations ne seraient sûrement pas ce qu'elles sont. Merci aussi pour ton amitié et ta bonne humeur. Je n'oublie pas les confitures que tu m'avais fait découvrir.

A Marie-Sophie, cette belle blonde remplie de bonté et d'amitié. Ton soutien moral permanent ainsi que tes conseils d'amis m'ont été d'une immense utilité durant mon séjour en Belgique. Merci pour tout Msophie, et surtout pour l'intérêt que tu portes à la réussite de ce travail.

Salam Mazen, je te remercie pour ton amitié et aussi pour tes conversations quoiqu'épisodiques. Ta présence au labo m'a été d'une utilité certaine. L'intérêt commun des mycorhizes nous a rapprochés. En espérant que tu n'es pas totalement 'mycorhizé'.

A vous aussi, Christelle et Aricia, bien que je vous aie connues tardivement, je vous dis merci pour votre soutien et vos conversations.

Didier, tu connais mes sentiments à ton égard et à celui de ta famille. Je n'ai pas besoin de les exprimer ici car ils rempliraient beaucoup de pages. Juste deux ou trois mots, du fond du cœur, je vous dis merci pour tout à ta famille et à toi, nos destins restent et resteront liés et scellés.

Commandant Djibril, à toi, je ne sais quoi dire. Tu as joué tous les rôles pour la réussite de ce travail. En ma présence ou non, tu n'avais cessé de m'apporter toute l'aide

requis et même au-delà. Tu as été en même temps grand-frère, ami, confident et hôte. Merci beaucoup et quelque part, cette thèse est la tienne car sans toi, elle n'y serait pas. Merci aussi à ta femme Aïchatou qui m'a adopté dès le premier jour, tes enfants et le Lieutenant Bouzou Mani, le 'Nassara' et sa famille dont je me plais à taquiner.

Dr Manzo, Hélène, Fayza et Maïssane, sans vous je n'ose même pas imaginer comment aurais-je pu vaincre la nostalgie de ma famille lors de mes fréquents séjours en Belgique. Vous avez constitué une seconde famille pour moi dans ce pays, loin des miens. Merci pour votre inestimable soutien moral et votre fraternité.

A tous les agents de la Direction Régionale de l'Environnement de Zinder. Colonel Zabeirou, Capitaines Abdoulaye Sarga et EL Moussa A. Roufaï, Lieutenants Nourou Kané et Sani Boukari dit Babayé Kahicolonel, l'adjudant Malan Oumarou de la régie forestière, tous les agents de la Brigade Régionale et tous les auxiliaires sans oublier ma complice le Sergent Mme Moustapha Haoua, je vous prie d'accepter mes remerciements ainsi que ma reconnaissance pour toute l'aide multiforme que vous m'avez apportée durant la rédaction de ce document dans votre service.

A toi Maâlouma, ma femme chérie, d'avoir su comprendre et supporter mon absence durant mes multiples séjours en Belgique, et Abdoul Razak, notre fils bien-aimé, d'avoir manqué de mon affection quand tu 'germais' dans le ventre de ta maman. Merci pour votre amour, votre soutien et votre patience. Abdoul, tu comprendras l'utilité de ce travail quand tu seras grand.

Aux familles Amadou Roufaye Nahadjo, Amadou Lawal dit Edmond, Sidi Bachir, Bouhari Moha, El Hadji Issaka Brah, El Hadj Moha, Nahadjo, El Hadji Manzo Mani et aux nombreux tantes et oncles, cousines et cousins que j'ai eu cette immense chance d'avoir, je vous témoigne, ici, toute ma gratitude pour votre soutien permanent et vos encouragements.

A tous les amis de Zinder, de Niamey et de Gouré, je vous adresse mes remerciements et ma reconnaissance pour votre soutien et votre amitié.

Aux populations de Tchago et de Woro pour leur hospitalité et leur collaboration dans l'exécution de nos travaux de terrain.

Je dis grand merci à ma famille qui m'a toujours apporté son soutien et à tous ceux qui m'ont apporté leur aide dans la réalisation de ce travail, d'une manière ou d'une autre et dont je n'ai pas cité les noms ici.

LISTE DES ABREVIATIONS

AGRHYMET	AgroHydroMétéorologie
BP	Before Present
CMA	Champignon Mycorhizien à arbuscules
CNEDD	Conseil National de L'Environnement pour un Développement Durable
DDRA	Direction Départementale des Ressources Animales
FAO	Food and Agriculture Organisation
GI	Traitement au <i>Glomus intraradices</i>
GLM	General Linear Model
INRAN	Institut National des Recherches Agronomiques du Niger
INRA	Institut National des Recherches Agronomiques
I	Intensité de mycorhization
INS	Institut National de la Statistique du Niger
Lc	Traitement à l'Inoculum local
LSD	Least Significant Difference
MHE	Ministère de l'Hydraulique et de l'Environnement
MHE/LCD	Ministère de l'Hydraulique, de l'Environnement et de la Lutte Contre la Désertification
ONG	Organisation Non-Gouvernementale
PNEDD	Programme National de L'Environnement pour un Développement Durable
PGRN	Projet de Gestion des Ressources Naturelles
PNUD	Programme des Nations Unies pour le Développement
PF	Poids Frais
PS	Poids Sec
PIC	Projet Inter-universitaire ciblé
RPG	Recensement Général de la Population
RGP/H	Recensement Général de la Population et de l'Habitat
SAA	Service d'Arrondissement de l'Agriculture
SDA	Service Départemental de l'Agriculture
SDP	Service Départemental du Plan
T	Témoin

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Image satellitaire de la zone d'étude avec la localisation de Gouré et des sites de Woro et de Tchago (Image spot de 31/10/1996).....	10
Figure 2: Parts de revenus agricoles de Gouré (D'après Jahiel, 1998).....	12
Figure 3: Evolution de l'effectif du cheptel de Gouré de 1990 à 2003 (D'après les chiffres de la Direction Départementale des Ressources Animales/Gouré, 2004).....	13
Figure 4: Répartition mensuelle des précipitations à la station de Gouré (Ozer <i>et al.</i> , 2005)..	16
Figure 5: Précipitations annuelles et moyennes des sous-séries pluviométriques au cours des trois périodes «humide», de «sécheresse» et «actuelle» (Ozer <i>et al.</i> , 2005).....	17
Figure 6: Rose des vents à la station de Gouré en 1984 (Ozer <i>et al.</i> , 2005).....	18
Figure 7: Image satellitaire de la zone de Tchago (Source : Ikonos du 25/07/2005).....	46
Figure 8: Image satellitaire de la zone de Woro (Source : Ikonos du 11/03/2004).....	47
Figure 9: Dispositif expérimental de Tchago.....	60
Figure 10 : Dispositif de collecte d'espèces floristiques.....	62
Figure 11 : Dispositif expérimental de Woro.....	73
Figure 12: Evolution annuelle du nombre d'espèces floristiques recensées.....	79
Figure 13: Evolution de la diversité bêta dans les bandes de 2006 à 2007.....	80
Figure 14: Evolution de la diversité bêta entre les bandes de 2006 à 2007.....	81
Figure 15: Evolution des familles dominantes le long de la saison pluvieuse 2006.....	82
Figure 16: Variation de taux de survie sur le site transplanté de Tchago.....	87
Figure 17: Evolution de la croissance en hauteur des espèces sur le site de Tchago.....	88
Figure 18: Taux d'hydratation des espèces après 6 jours de conduite à sec.....	90
Figure 19: Intensité de mycorhization naturelle des espèces adultes.....	95
Figure 20 : Taux de viabilité des différents types de spores de Glomales.....	97
Figure 21: Moyennes de l'intensité de mycorhization des cultures pièges selon les différents traitements.....	98
Figure 22: Effets de la mycorhization sur la croissance en longueur des plantes-pièges.....	99
Figure 23: Intensité de mycorhization chez les espèces ligneuses selon les traitements.....	103
Figure 24: Effets de la mycorhization sur la production de la biomasse totale des espèces..	104
Figure 25: Croissance en hauteur des espèces en pépinière selon les traitements.....	105
Figure 26 : Taux d'hydratation des espèces après six jours de stress hydrique.....	106
Figure 27 : Taux de survie des espèces transplantées sur la dune (3 ans après plantation)...	107
Figure 28 : Croissance en hauteur des espèces sur le site selon les traitements.....	108

Figure 29 : Effets de la mycorhization sur la croissance du diamètre au collet sur le site....	109
Figure 30 : Nombre de ramifications des plants sur le site selon les traitements.....	110

LISTE DES CARTES

Carte 1 : Carte administrative du Niger	6
Carte 2 : Les zones bioclimatiques du Niger.....	8
Carte 3 : Carte pluviométrique du Niger avec les isohyètes calculés pour les périodes humide (1950-1967) et sèche (1968-1985) (Ozer et Erpicum, 1995).....	9
Carte 4 : Localisation de la Région de Zinder (en haut) et le Département Gouré (en bas) (Localisation de Woro et de Tchago) (Source : Base des données AGRHYMET)	10
Carte 5 : Limites des zones agricole et pastorale du département de Gouré.....	11
Carte 6 : RélieF du Département de Gouré (Source : SDP Gouré, 2000).....	14
Carte 7 : Typologie des sols dans le Département de Gouré (Source : SDP Gouré, 2000) ...	21

LISTE DES PHOTOS

Photo 1: Vue de la végétation de dunes autour d'une cuvette	24
Photo 2: Vue du clayonnage installé sur la dune de Woro en juin 2005.....	36
Photo 3 : Vue intérieure de la cuvette de Lafiya	44
Photo 4 : <i>Acacia nilotica</i>	48
Photo 5 : <i>Acacia senegal</i>	49
Photo 6 : <i>Acacia tortilis</i>	51
Photo 7 : <i>Balanites aegyptiaca</i>	52
Photo 8 : <i>Bauhinia rufescens</i>	54
Photo 9 : <i>Prosopis chilensis</i>	55
Photo 10 : <i>Prosopis juliflora</i>	56
Photo 11 : Colonisation des claires par des herbacées une année après l'installation.....	77
Photo 12 : Les différents types de spores identifiées (x 400).....	96

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Processus physiologiques améliorés chez les plantes par les mycorhizes.....	39
Tableau 2 : Prétraitement des semences (D'après Guissou, 2001).....	58
Tableau 3 : Nombre d'espèces recensées dans les bandes A, B, C et T entre 2005 et 2007....	78

TABLE DES MATIERES

CHAPITRE I : INTRODUCTION:	1
I. Problématique	2
II. Cadre de l'étude:	6
2.1. Situation géographique et climatique du Niger.....	6
2.2. Présentation de la zone d'étude.....	9
2.2.1. Localisation de la zone d'étude.....	9
2.2.2. Population et activités socio-économiques.....	11
2.2.3. Le relief.....	13
2.2.4. Le climat.....	15
2.2.4.1. Les précipitations.....	15
2.2.4.2. Les vents.....	17
2.2.4.3. Les températures.....	19
2.2.5. L'hydrographie.....	19
2.2.6. Les sols.....	20
2.2.7. La végétation.....	22
III. Techniques de fixation des dunes:	24
3.1. La fixation des dunes dans le monde.....	24
3.2. Fixation des dunes au Niger, et plus particulièrement dans la zone de Gouré.....	31
3.3. Technique de fixation des dunes dans la zone d'étude.....	35
IV. Les mycorhizes	38
V. Les essais	41
CHAPITRE II : MATERIEL ET METHODES:	42
I. Matériels et méthodes communs:	43
1.1. Choix des champs expérimentaux : Les cuvettes et les dunes.....	43
1.1.1. La cuvette de Tchago.....	45
1.1.2. La cuvette de Woro.....	46
1.2. Choix des ligneux.....	47
1.3. Préparation du substrat de culture en pépinière.....	57
1.4. Prétraitement des semences.....	57
1.4.1. Les ligneux.....	58
1.4.2. Les plantes-pièges.....	59
II. Matériels et méthodes spécifiques aux différents essais	60
2.1. Essai N°1 : Evaluation de l'efficacité du clayonnage.....	60
2.2. Dispositif de la dune de Tchago : La barrière mécanique.....	60
2.2.1. Dispositif de collecte de suivi de la végétation herbacée.....	61
2.2.2. Méthodes d'analyse.....	62
2.2. Essai N°2 : Selection d'espèces ligneuses adaptées à la fixation des dunes.....	63
2.2.1. Dispositif de la dune de Tchago.....	63
2.2.2. Paramètres suivis.....	64
2.2.3. Dispositif de la pépinière.....	64
2.2.4. Paramètre suivi.....	64
2.3. Essai N°3 : Diversité des populations des Glomales et production d'inoculum.....	65

2.3.1.	Collecte d'échantillons.....	65
2.3.2.	Extraction des spores.....	65
2.3.3.	Identification des formes des Glomales.....	66
2.3.4.	Paramètre suivi.....	66
2.3.5.	Piégeage des Glomales dans des sols et production de l'inoculum fongique.....	66
2.3.6.	Paramètres suivis.....	68
2.4.	Essai N°4 : Potentialités de l'inoculation mycorhizienne des espèces fixatrices des dunes.....	68
2.4.1.	Dispositif de la pépinière.....	69
2.4.2.	Méthode utilisée de coloration des racines.....	70
2.4.3.	Paramètres suivis.....	71
2.4.4.	Dispositif de la dune de Woro.....	72
2.4.5.	Paramètres suivis.....	74
III.	Analyses statistiques.....	74
	<i>CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSION.....</i>	76
I.	Evaluation de l'efficacité du clayonnage sur base des relevés floristiques.....	77
1.1.	Résultats.....	77
1.2.	Discussion.....	82
1.3.	Conclusion partielle.....	85
II.	Sélection d'espèces ligneuses adaptées à la fixation des dunes.....	87
2.1.	Résultats.....	87
2.2.	Discussion.....	90
2.3.	Conclusion partielle.....	93
III.	Diversité de Glomales des sols de Gouré et production d'inoculum.....	95
3.1.	Résultats.....	95
3.2.	Discussion.....	100
3.3.	Conclusion partielle.....	101
IV.	Potentialités de l'inoculation mycorhizienne des espèces fixatrices des dunes.....	103
4.1.	Résultats.....	103
4.2.	Discussion.....	110
4.3.	Conclusion partielle.....	113
	<i>CHAPITRE IV : CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES.....</i>	114
	<i>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....</i>	114
	<i>ANNEXES.....</i>	114



CHAPITRE I :
INTRODUCTION

I. PROBLEMATIQUE

Le Niger, vaste pays continental, couvre une superficie de 1 267 000 km² et se situe entre 11 °37' et 23°33' de latitude Nord, et entre 0°06' et 16° de longitude Est.

Le Sud du Niger, bien qu'agro-pastoral, est une zone aride. Le Sahel, est une zone écologique très vulnérable en cas de sécheresse plus ou moins longue.

Les trois quart du pays sont désertiques (partie Nord). Ceci explique que 85 % de la population totale, qui compte 12,9 millions d'habitants (2007) (INS, 2007), se concentrent sur le quart restant, dans la bande Sud plus humide.

Le Niger est le quatrième pays le plus pauvre de la planète avec un indice de développement humain extrêmement bas (PNUD, 2007) et une économie essentiellement basée sur les activités agro-pastorales qui occupent 90 % de la population, en majorité rurale. Cette population rurale représente 85 % de la population totale (INS, 2007).

A l'instar des autres pays sahéliens, le Niger connaît une anomalie climatique très prononcée depuis plusieurs décennies. Les travaux de Hountoundji *et al.* (2004) illustrent très bien l'évolution climatique de cette zone. En effet, selon ces travaux, depuis la fin des années 1960, la région sahélienne est gravement affectée par le déficit pluviométrique le plus important, tant dans son intensité que dans sa durée, jamais enregistré au cours du 20^{ème} siècle (Hulme, 1996 ; Dai *et al.*, 1998 ; Morel, 1998). Le paroxysme de cette sécheresse a été atteint durant la première moitié des années quatre-vingt (Nicholson, 1985) et a provoqué des famines de grande envergure. La diminution généralisée des précipitations au Niger, jusqu'au début des années nonante, est marquée par un retrait des courbes isohyètes vers le Sud, atteignant parfois les 200 km (Ozer et Erpicum, 1995). La situation est d'autant plus préoccupante dans l'Est du pays, où des zones de grandes productions agricoles sont passées du Sahel à culture sous pluies (limite septentrionale de 300 mm) au Sahel dit pastoral, notamment Tanout, Gouré et Diffa (Ozer, 1993). Ce glissement a eu des conséquences très négatives pour le monde rural, notamment par la diminution plus importante de pluviométrie durant le mois d'août, qui correspond à la période critique des besoins en eau des plantes. La zone agricole s'en est trouvée ainsi réduite de moitié (Ozer, 1995).

Cependant, depuis le début des années nonante, on assiste à une augmentation de la pluviométrie. Mais ce retour assez appréciable de la pluviométrie n'a pas eu d'effets significatifs sur les conditions environnementales de la région (Ozer *et al.*, 2005).

A cette précédente détérioration climatique vient se greffer une augmentation drastique de la pression anthropique sur un environnement déjà fragilisé. En effet, le rythme de la croissance démographique (+ 3,45 % par an) dépasse largement celui de la croissance de

la production agricole (2,2 %), tandis que le rendement des cultures est constamment à la baisse depuis le début des années soixante (FAO, 2004).

La population du Niger, le plus souvent totalement dépendante de son environnement direct (FAO, 2004), est passée de 5,1 millions en 1977 (RGP, 1977) à 12,9 millions d'habitants en 2007 (INS, 2007) pour une superficie cultivable de 15 millions d'hectares, soit 12 % de la superficie totale du pays. Les impacts immédiats de cette explosion démographique restent, entre autres, l'expansion des champs agricoles sur les terres marginales, la surexploitation des sols et des ressources hydriques, le surpâturage, le piétinement, les migrations des populations vers le Sud ou vers les noyaux urbains et la sédentarisation massive des populations nomades (Thomas et Middleton, 1994 ; Ozer, 2000).

Il en résulte une dégradation du milieu, qui se traduit dans le paysage par la diminution du rendement des cultures (Gommes, 1998), par la remise en mouvement des dunes autrefois fixées par la végétation (Ozer, 2002) et par un déboisement excessif (Ozer, 2004). Le potentiel productif se dégrade de plus en plus à la faveur des modifications climatiques et des actions anthropiques sur les ressources naturelles. Les équilibres des écosystèmes sont continuellement et gravement perturbés et les ressources naturelles disponibles s'amenuisent au fil du temps.

En effet, le rythme de déboisement au Niger serait estimé à environ 120 000 ha de forêts par an (SE/SDR, 2006). La FAO (2006) estimait que, entre les années 2000 et 2005, le taux de déboisement était de 1 % par an de la superficie totale des forêts. La dépendance de la population par rapport au bois de feu et au charbon ne faiblit pas. En l'absence d'alternative énergétique, ceci engendre clairement une pression accrue sur les ressources forestières du pays en plus des besoins croissants en zones de culture et de pâturage. De nombreuses forêts ont cédé le pas à des steppes arbustives et herbacées avec la présence d'arbres dispersés. De plus, 250 000 ha de sols cultivables sont perdus chaque année au Niger à cause de la désertification (SE/SDR, 2006). On estime à plus d'un million de km², la superficie du pays désertique ou en cours de désertification, dont 38 000 km² de terres agricoles¹. Les efforts de réhabilitation demeurent très insuffisants et concernent à peine 20 000 ha par an².

Malgré les chiffres publiés (FAO, 2004 ; FAO 2006 ; SE/SDR...), les données concernant le rythme de déboisement sont très variables et doivent être considérées avec beaucoup de prudence (Ozer, 2009).

¹ Directeur National de l'Environnement lors du séminaire sur le semis direct à Zinder, 1999.

² Communication du Ministre de l'Environnement et de la lutte contre la désertification, 2007.

Le pays vit constamment dans un contexte économique et environnemental très précaire où les risques de famine et de dégradation du milieu sont très élevés.

Cette situation de précarité humaine et environnementale se pose avec beaucoup plus d'acuité dans le Sud-Est du pays. Les sécheresses récurrentes, conjuguées à la forte pression anthropique sur les ressources naturelles, ont eu, comme principale conséquence, la remobilisation de dunes de sable qui étaient jadis fixées et l'ensablement des terres. Les risques d'érosion éolienne et le transport de particules vers les zones dépressionnaires, à savoir cuvettes et bas-fonds, se trouvent amplifiés (Tidjani, 2008). Ces phénomènes réduisent considérablement les potentialités spatiales et productives de ces cuvettes à haute productivité. Celles-ci sont devenues le principal capital dans la production agricole depuis que le rendement des champs a diminué (Jahiel, 1998).

Dans le département de Gouré, l'ensablement des cuvettes constitue un véritable problème écologique et économique. Ainsi, 110 000 ha de sols sur les 126 000 ha sont menacés par le phénomène d'ensablement (SAA Gouré, 2002). Jahiel (1998) estimait que les parts de revenu agricole global s'élevaient à 51,3 % pour les cultures de cuvette contre 15,3 % seulement pour les cultures pluviales, le reste se répartissant entre l'élevage (25,3 %) et la vente de natron et de produits artisanaux (8,1 %). De même, sur les 900 cuvettes recensées en 1977 dans le département de Gouré, 300 qui sont en activité (SAA Gouré, 2000) mais la plupart reste toujours sous la menace de l'ensablement par des dunes vives.

Selon Jahiel (1998), la disparition progressive de ce capital productif a conduit inévitablement à la dégradation du niveau de vie des populations. La famine est aujourd'hui une menace permanente dans cette zone, où l'exode rural est devenu une réalité et un comportement social. De nos entretiens avec les populations, il ressort que les trois quarts des jeunes de moins de 35 ans partent, chaque année, en exode vers la Libye et le Nigéria dès la fin des récoltes.

Pour faire face à ce risque de catastrophe humaine et écologique, de nombreuses initiatives ont été entreprises plus ou moins isolément, sur la base de différents projets.

Celles-ci ont conduit à la formulation et à l'exécution de nombreux plans et programmes d'intervention de restauration écologique, basée sur la fixation mécanique et biologique de dunes vives. Les résultats obtenus jusqu'ici demeurent en dessous des attentes et limités face à l'ampleur du phénomène. Force est de constater que le processus d'ensablement des cuvettes se poursuit dans cette zone avec ses corollaires de migration de la population, qui abandonne les terres devenues incultes, et la déliquescence du tissu économique de toute la région. C'est dire que les impacts de ces tentatives de fixation biologique des dunes demeurent mitigés.

Mise à part l'absence de protection des plantations, très souvent observée, cet échec est en grande partie lié à la technique utilisée dans la fixation de dunes. Le choix des espèces ligneuses utilisées est, parfois, inapproprié aux conditions écologiques de la dune ou climatiques de la zone. Les espèces utilisées ne survivent pas aux conditions édaphiques sévères caractérisées par un déficit hydrique, ou sont très rapidement ensevelies par le sable à cause de leur croissance très lente. Pourtant, l'adéquation entre les ligneux et les conditions hydriques des sites est l'un des facteurs déterminants de la réussite des plantations (Okali *et al.*, 1973), particulièrement dans la fixation des dunes.

De plus, le clayonnage érigé en barrière mécanique est fréquemment inefficace. Beaucoup de paramètres techniques importants, tels que la porosité, la hauteur et l'orientation du dispositif, ou encore la topographie de la dune, ne sont pas pris en compte, d'où la défaillance de cet aménagement dans son rôle de brise-vent. L'entretien et un suivi réguliers des aménagements, bien que fondamentaux pour la réussite de la fixation des dunes dans le cas où toutes les conditions sont réunies, demeurent également défailants (MH/E, 1995 ; Ichaou et Guibert, 2009).

Il a été démontré que la symbiose mycorhizienne, qui est une association symbiotique entre les racines des plantes et les champignons mycorhiziens à arbuscules (CMA), augmente la résistance des plantes au stress hydrique (Davies *et al.*, 1992 ; Subramanian et Charest, 1997), stimule leur croissance (Hamel et Plenchette, 2007), améliore le taux de survie des plants (Garbaye, 1991) et participe à l'amélioration de la structure du sol (Nouaim et Chaussod, 1996). Ces effets induits par les CMA, qui ont des applications en agriculture, en horticulture et plantations arbustives (Strullu, 1991 ; Fortin *et al.*, 2008), sont aussi recherchés pour la réhabilitation de sols pollués (Bell *et al.*, 2003). Quelques études ont montré les effets bénéfiques de la mycorhization de plantes fixatrices des dunes dans leur établissement, leur croissance et l'aptitude d'aggrégation des grains de sable par leurs racines mycorhizées (Degens *et al.*, 1999 ; Greipsson et El-Mayas, 2000 ; Funatsu *et al.*, 2005). Ainsi, la mycorhization contribuerait à une amélioration de la fixation biologique des dunes.

Bien que des études sur ces aspects de la fixation de dunes et d'inoculation mycorhizienne des plants aient été menées ailleurs, cet axe de recherche n'a pas encore été exploré au Niger, alors que la lutte contre l'ensablement demeure la préoccupation environnementale majeure du pays. D'où la présente étude avec comme objectif général de « Protéger les zones de culture en fixant les dunes vives qui les menacent d'ensablement et améliorer les chances de réussite des plantations réalisées pour la fixation biologique des dunes ».

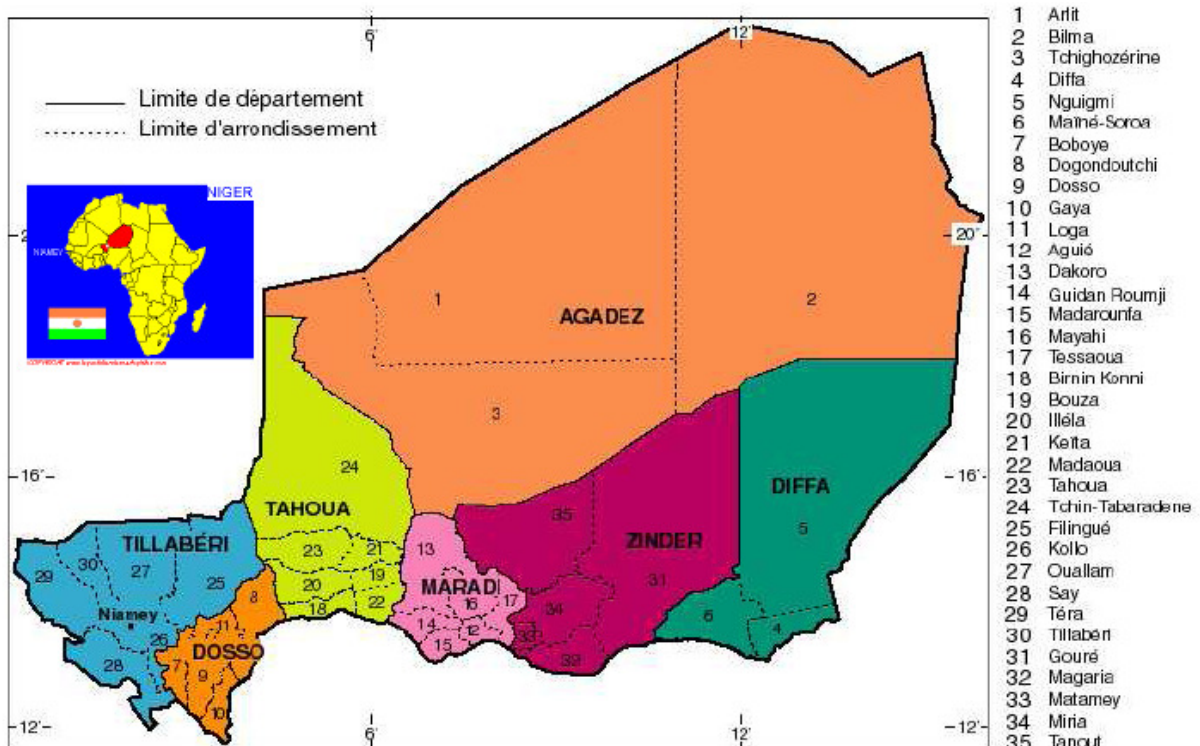
Les objectifs spécifiques de ce travail sont de vérifier les hypothèses suivantes :

1. la barrière mécanique influence positivement la colonisation des parcelles par les herbacées ;
2. des espèces ligneuses tolérantes au stress hydrique peuvent être sélectionnées, sur base des critères morpho-physiologiques, pour être utilisées dans la fixation biologique des dunes ;
3. l'inoculation avec des souches indigènes isolées et un CMA allogène, *Glomus intraradices*, peut améliorer la fixation biologique de dunes par rapport à mycorhization naturelle des plants.

II. CADRE DE L'ETUDE

2.1. Situation géographique et climatique du Niger

Pays de l'Afrique de l'Ouest totalement enclavé, le Niger (Carte 1) est entouré par le Burkina Faso et le Mali à l'Ouest, l'Algérie et la Libye au Nord, le Tchad à l'Est, le Nigeria et le Bénin au Sud. Le pays se présente comme une vaste péninsule dont le faible relief (avec une altitude moyenne de 300 m) est interrompu seulement par le massif de l'Aïr au Nord et les hauts plateaux du Djado au Nord-Est. Le Niger couvre une superficie de 1 267 000 km², dont les trois quarts se situent dans le désert du Sahara.



Carte 1 : Carte administrative du Niger

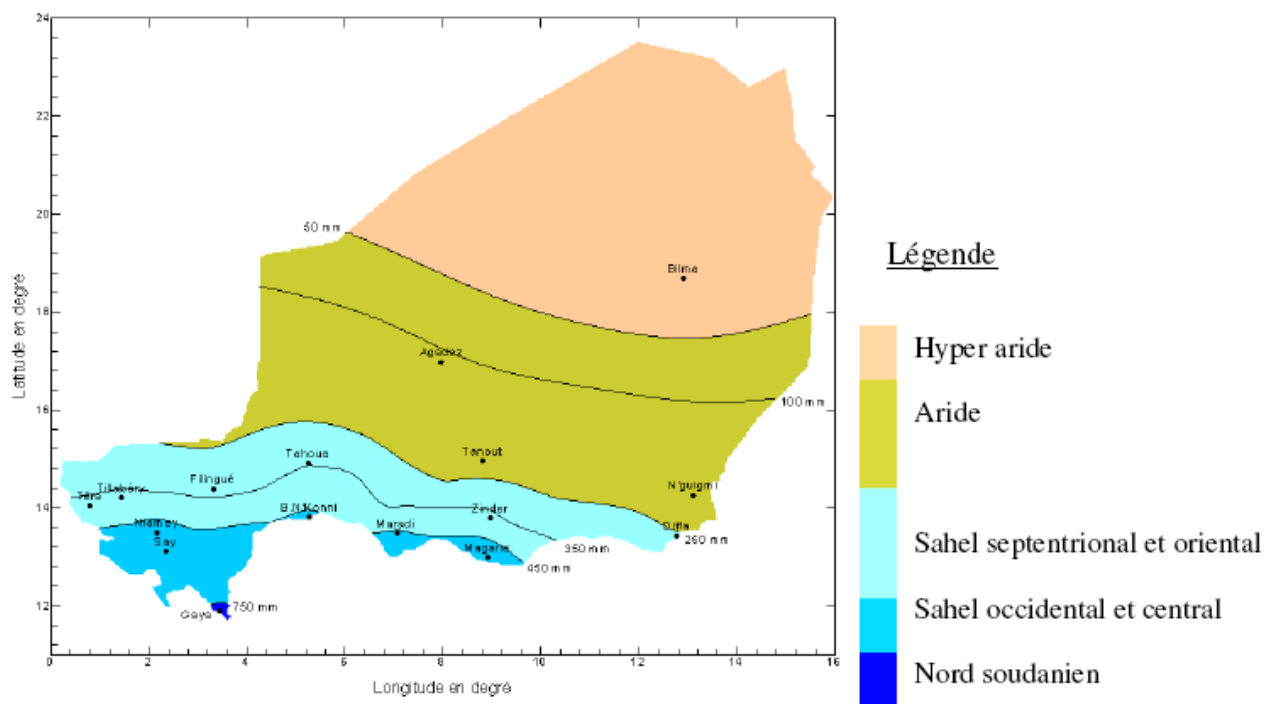
De par sa position géographique, le Niger est l'un des pays les plus chauds du globe. Le climat de ce pays est chaud et, dans la plupart des zones, sec. Il est caractérisé par un climat tropical sec aux conditions extrêmes.

Les pluies sont généralement orageuses, entraînant une forte érosion. Les valeurs mensuelles moyennes de l'évapotranspiration potentielle et de la température sont assez élevées, notamment pendant la saison chaude (mars à juin). Elles sont respectivement de 180 à 270 mm et de 24 à 35 ° C (CNEDD, 2003).

Les vents chauds et secs d'Est et du Nord-Est (Harmattan), de vitesse relativement élevée, sont dominants pendant la saison sèche (octobre à mai), tandis que, pendant la saison des pluies (juin à septembre), les vents humides du Sud et du Sud-Ouest (Mousson) de vitesse modérée sont dominants (CNEDD, 2003).

Du Nord au Sud, on distingue (carte 2) :

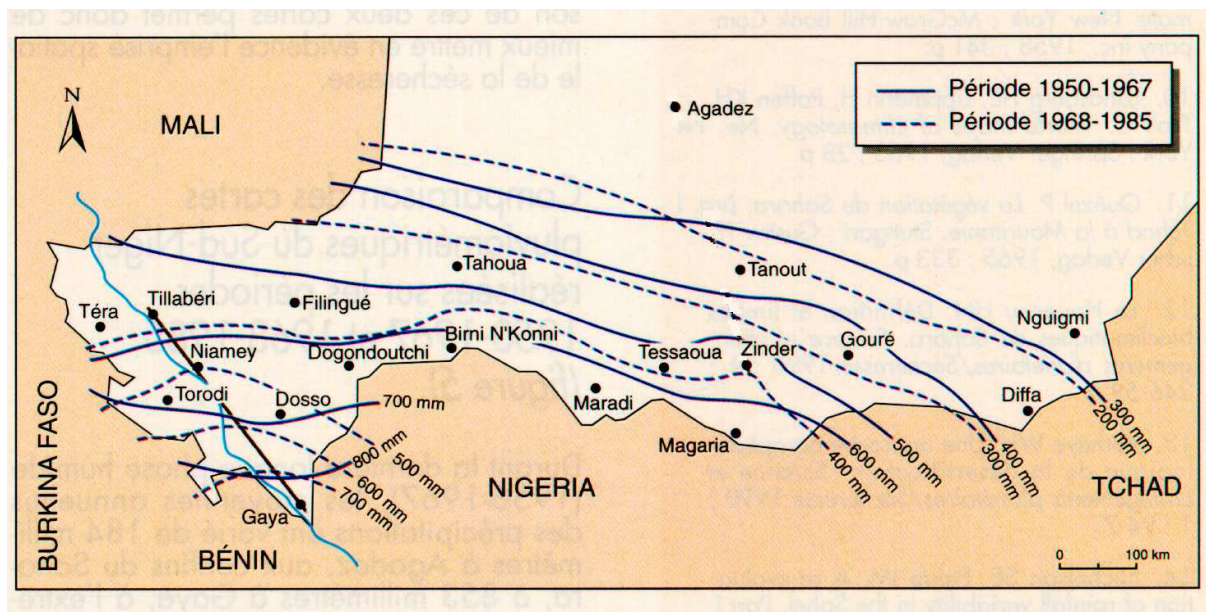
- Le climat désertique (régions arides et hyper-arides occupées par le Sahara qui couvre tout le Nord du pays), caractérisé par un cumul pluviométrique annuel inférieur à 150 mm et une saison des pluies qui dure à peine 1 mois ;
- Le climat sahélien, présentant deux types : Le Sahel pastoral qui est plus sec (partie septentrionale et orientale du pays) caractérisé par une pluviométrie annuelle comprise entre 150 et 300 mm et une saison des pluies qui dure 1 à 2 mois et le Sahel de culture sous pluie (partie occidentale et centale du pays), appelé aussi domaine de l'agriculture pluviale par excellence. Ce domaine est caractérisé par une pluviométrie annuelle comprise entre 300 et 700 mm et une durée normale de la saison des pluies comprise entre 2 et 3 mois (de juillet à septembre).
- Et le climat soudanien (extrémité méridionale du pays), caractérisé par un cumul pluviométrique annuel supérieur à 700 mm et une saison des pluies qui dure plus de 3 mois.



Carte 2 : Les zones bioclimatiques du Niger
 (Source : Département de Géographie, UAM – Niamey, 1999)

La combinaison des différents facteurs du climat, notamment la pluie, les températures et les vents, permet de distinguer quatre saisons :

- une saison dite froide (décembre à fin février), caractérisée par des nuits très fraîches avec des températures pouvant descendre en dessous de 10°C et même 0°C dans la zone septentrionale du pays et une humidité relative très faible ;
- une saison sèche et chaude (mars à mai), avec des vents brûlants, des températures qui peuvent dépasser 45°C et une humidité relative croissante ;
- une saison des pluies (juin à septembre), caractérisée par des pluies, souvent orageuses, une humidité relative élevée et une température moyenne de 33°C ;
- une saison chaude sans pluie (octobre à novembre), avec une température moyenne de l'ordre de 35°C et une humidité relative élevée.



Carte 3 : Carte pluviométrique du Niger avec les isohyètes calculés pour les périodes humide (1950-1967) et sèche (1968-1985) (Ozer et Erpicum, 1995).

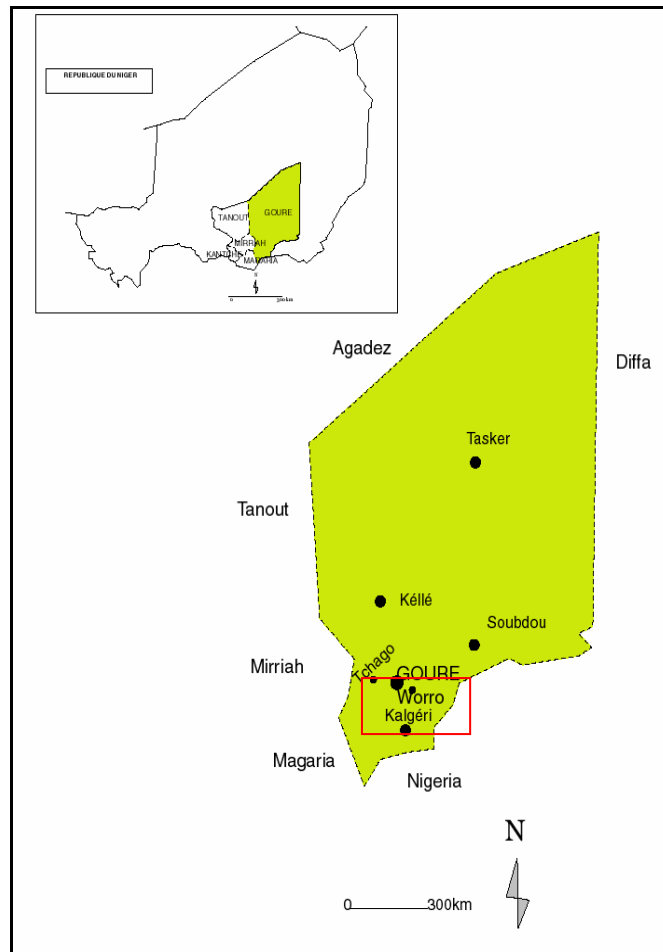
Depuis quelques décennies, à l'intar de tous les pays du Sahel, le Niger a connu des périodes de sécheresse récurrentes et une diminution générale des précipitations. Conséquemment, les courbes isohyètes se sont déplacées vers le Sud sur une distance de 75 à 200 km parfois (Ozer et Erpicum, 1995), faisant passer la proportion de zones désertiques de 66 à 77 % en 40 ans (Carte 3). Mais, depuis l'année 1988, on assiste dans la région de Gouré à un retour à des conditions pluviométriques plus humides, même si elles n'atteignent pas celles d'avant 'la grande sécheresse' de la période 1936 à 1967 (Ozer *et al.*, 2005).

Cependant, ce retour à des conditions plus humides ne semble pas s'accompagner d'une amélioration notable des conditions environnementales. La pression anthropique est l'explication la plus plausible à cette réponse limitée de la végétation à l'amélioration des conditions de précipitations (Ozer *et al.*, 2005).

2.2. Présentation de la zone d'étude

2.2.1. Localisation de la zone d'étude

Le département de Gouré (Carte 4) est compris entre 9°20' et 12°00' de longitude Est et 13°00' et 17°30' de latitude Nord. Avec 89 000 km² de superficie, il est le plus grand des cinq départements que compte la région de Zinder (appelée aussi Damagaram) (soit 61 % de la superficie de cette région). La ville de Gouré (Figure 1), chef lieu du département, est située à 162 km à l'Est de Zinder et à 1052 km à l'Est de la capitale Niamey.



Carte 4 : Localisation de la Région de Zinder (en haut) et le Département Gouré (en bas) (Localisation de Woro et de Tchago) (**Source :** Base des données AGRHYMET)

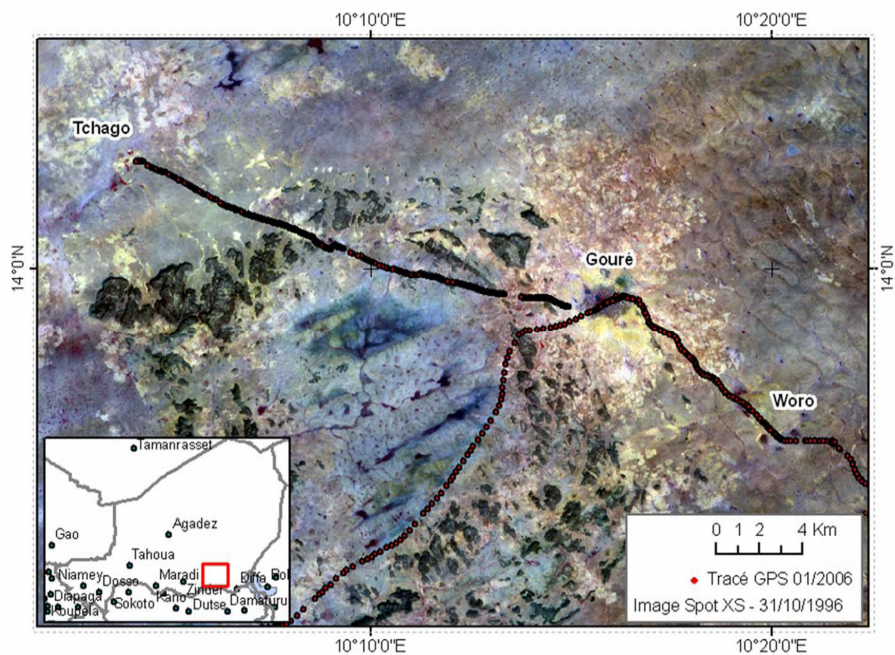
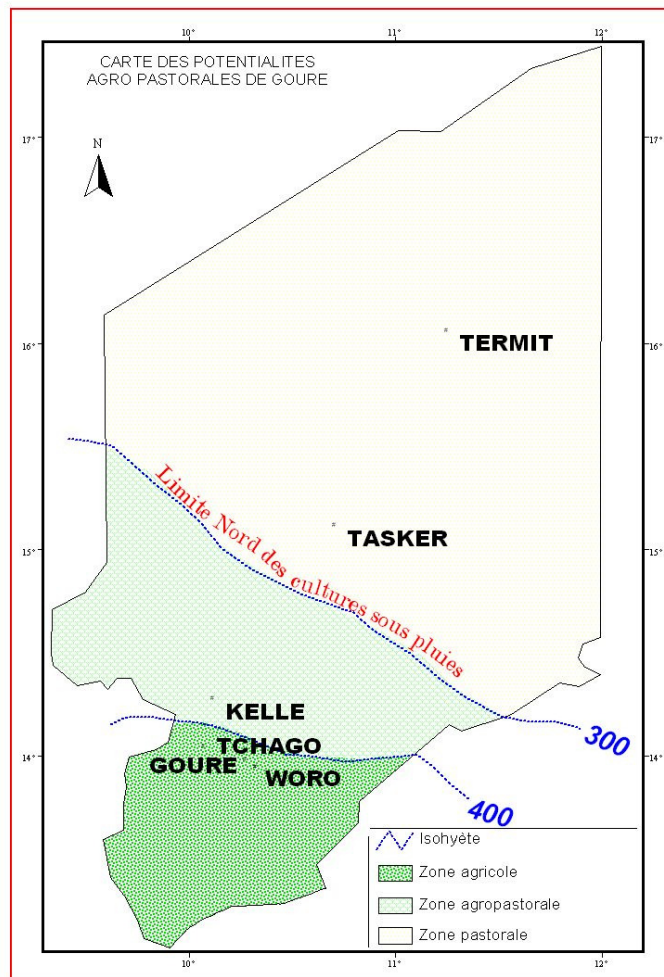


Figure 1 : Image satellitaire de la zone d'étude avec la localisation de Gouré et des sites de Woro et de Tchago (**Source :** Image spot de 31/10/1996)

2.2.2. Population et activités socio-économiques

Le département de Gouré compte une population de 227 400 habitants (RGP/H 2001) et une densité moyenne très faible, de l'ordre de 2,4 habitants/ km². Cette population est, cependant, très mal répartie dans l'espace. Elle est concentrée dans la partie méridionale, agro-pastorale, tandis que le Nord, dont l'activité principale est le pastoralisme, est très peu peuplé.

A l'instar des autres entités du pays, Gouré connaît une croissance démographique importante. En effet, en 1977, on y dénombrait 114 098 habitants (RGP 1977) ; en 1988, 162 275 habitants (RGP 1988) et, au dernier recensement de 2001, la population est passée à 227 400 habitants (RGP/H 2001). Six groupes ethniques témoignent de la diversité de cette population. Il s'agit des Kanouris (Manga et Dagra), des Peulhs, des Haoussas, des Toubous, des Touaregs et des Arabes.



Carte 5 : Limites des zones agricole et pastorale du département de Gouré
(Source : AGRHYMET, 2000)

Les principales activités sont l'agriculture et l'élevage (Figure 2 ci-dessous). La superficie des terres cultivées, qui était de 122 980 ha en 1982, est passée à 566 631 ha en 2001 (soit 7 % de la superficie totale du département) (SAA/Gouré, 2002). Cette agriculture se pratique essentiellement dans la bande Sud (Carte 5) qu'occupent les cantons de Bouné, Gouré, Gamou, Sud Kellé et la moitié Sud du secteur d'Alakoss. Le mil, le sorgho et le niébé constituent les principales cultures.

On y pratique aussi la culture de contre-saison dans les cuvettes et bas-fonds, à côté de cette agriculture pluviale. Les cultures de contre-saison, qui servaient de culture d'appoint il y a quelques décennies, tendent à devenir des cultures principales en raison de la faible productivité des champs (sols dégradés et lessivés) et des sécheresses fréquentes. Les principales cultures de contre-saison comprennent le maïs, le blé, la patate douce, l'oignon, les dattes, le poivron, la tomate, la laitue, la mangue, le chou, la papaye etc....

La croissance démographique, très importante, de la population de Gouré a comme principale conséquence, l'extension des superficies cultivées avec l'augmentation de la pression agricole sur les terres marginales.

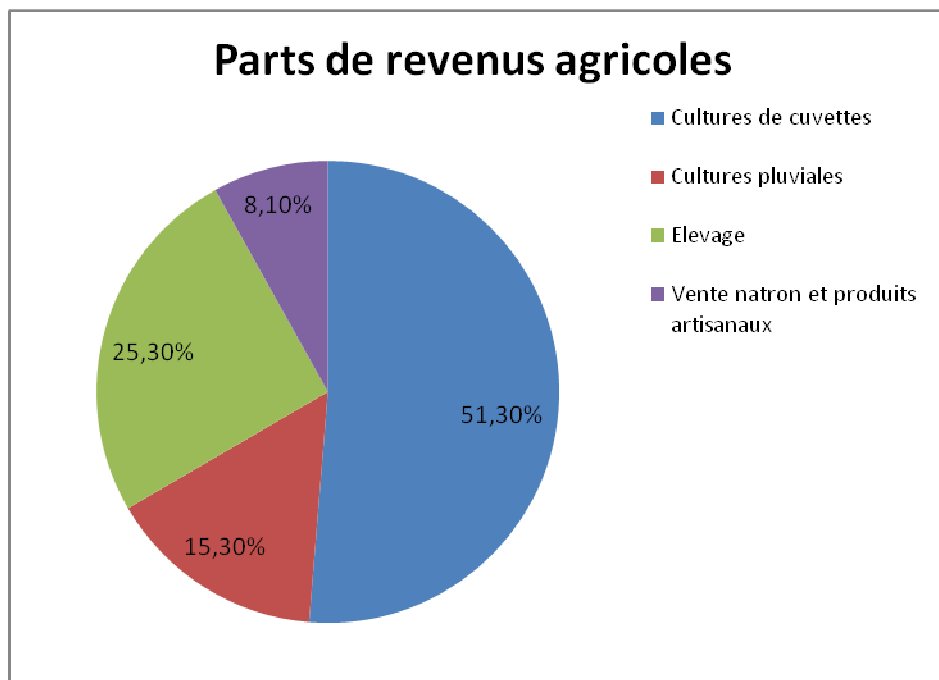


Figure 2 : Parts de revenus agricoles de Gouré (D'après Jahiel, 1998)

L'élevage, deuxième activité économique de la population du Département de Gouré, est le domaine des pasteurs nomades Peuhls, Toubous, Touaregs et Arabes. Le Nord du département est la zone de prédilection pour cette activité, où elle demeure la principale

occupation. Elle est aussi pratiquée dans le Sud, sous une forme sédentaire, où elle cohabite avec l'agriculture.

Le cheptel est constitué de bovins, ovins, caprins, camelins, asins et équins. Depuis la grande sécheresse de 1984, qui a réduit considérablement ce cheptel, on assiste à une évolution croissante de celui-ci, en termes de têtes d'animaux, comme le témoigne la Figure 3 ci-dessous. Cette augmentation considérable du cheptel a eu pour conséquence l'extension des terrains de parcours et de pâturage (Karimoune et Ozer, 1994) mais aussi la fragilisation de la structure du sol par le piétinement et le surpâturage qui mettent le sol à nu et le rendent sensible à l'érosion éolienne.

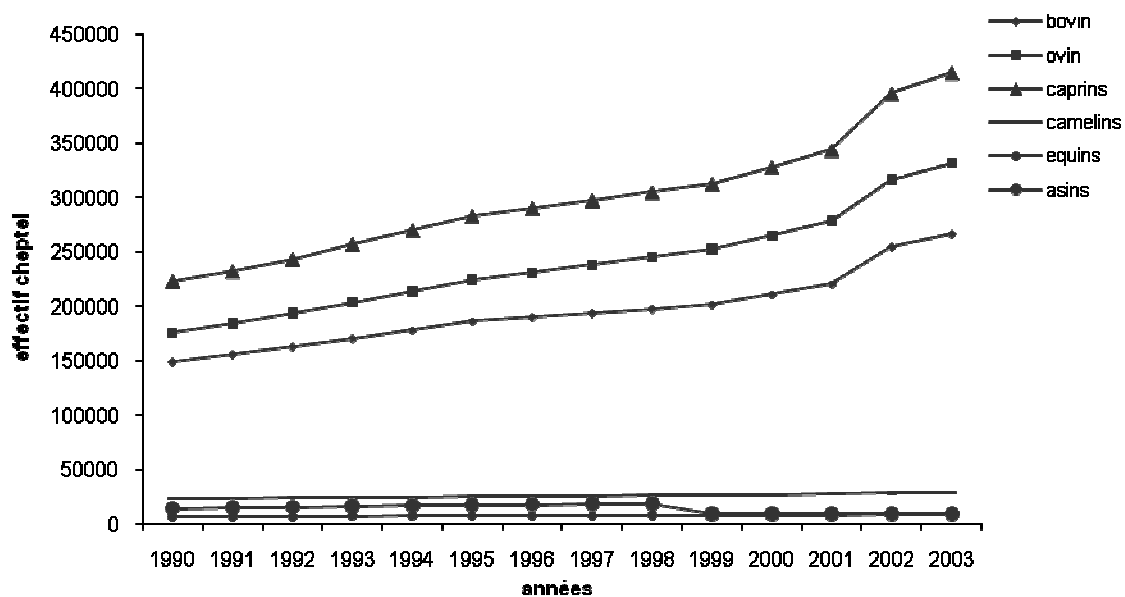
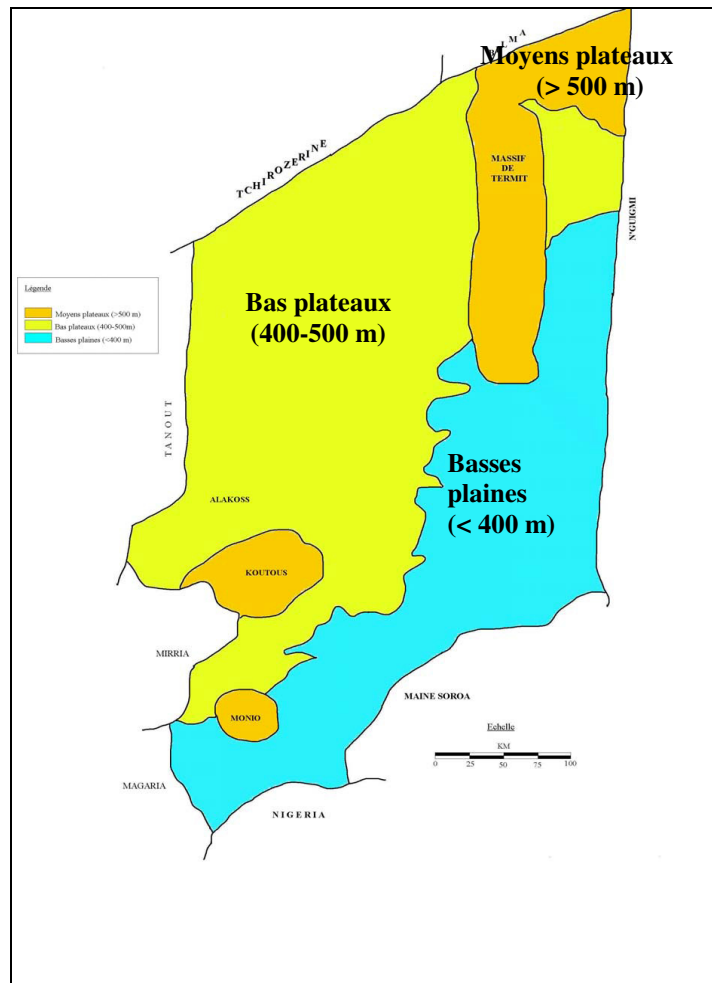


Figure 3 : Evolution de l'effectif du cheptel de Gouré de 1990 à 2003 (D'après les chiffres de la Direction Départementale des Ressources Animales/Gouré, 2004)

D'autres activités sont pratiquées à moindre échelle. Il s'agit du petit commerce, de l'extraction du sel et du natron, de l'exploitation de bois de feu et de l'artisanat.

2.2.3. Le relief

Le relief du département de Gouré présente des formations géologiques qui se traduisent par des plateaux moyens (plus de 500 m d'altitude) (le Mounio et le Koutous), des bas plateaux (environ 400 m d'altitude) (entre Gouré et les plateaux du Mounio) et des plaines, constituées de dunes vives ou fixées, de cuvettes et de mares (dans la bande Sud et la moitié Est de Gouré).



Carte 6 : Relief du Département de Gouré (**Source :** SDP Gouré, 2000)

Le relief est un paysage de plateaux avec une pente qui descend du Nord (zone de dunes et plateaux) vers le Sud (zone de mares et cuvettes) (Carte 6)

- Les plateaux moyens (plus de 500 m d'altitude) se répartissent dans le Sud et Nord du département.

1. Dans l'extrême Nord-Est se trouve le massif de Termit, allongé sur une distance de 171 km, de la vallée Dilia (Nord-Est) à la frontière Gouré-Bilma, avec une altitude de 710 m.

2. Dans le Mounio au Sud, on rencontre des formes plus ou moins arrondies, avoisinant les 530 m d'altitude.

3. Le Koutous, d'une superficie d'environ 40 500 km², est le domaine des plateaux.

- Les bas plateaux (altitude inférieure à 500 m), occupent près de la moitié du département, en dehors de la bande Sud et des hauts plateaux du Koutous, avec des altitudes

variant de 359 m (de Gouré aux hauts plateaux du Mounio) à 482 m (à l'extrême Nord du secteur Alakoss).

- Les basses plaines occupent toute la bande Sud et la moitié Est du département, suivant un axe d'orientation plus ou moins Nord-Est / Sud-Ouest. Elles sont constituées par des dunes de sable vives ou fixées, des mares et des dépressions assez profondes plus ou moins circulaires (les cuvettes). Selon Jahiel (1998), ces dépressions auraient pour origine le réseau d'écoulement des nombreux cours d'eau temporaires qui devaient fonctionner il y a 30 000 à 40 000 ans (période pluviale responsable de l'extension du lac Tchad) et entre 9 500 et 6 500 BP (maximum pluvial dénommé le Nigéro-Tchadien).

2.2.4. Le climat

Le département de Gouré, compris entre les isohyètes 450 mm et 100 mm, est situé en région sahélienne continentale. Il est soumis au climat tropical dont :

- saharien au Nord, désertique (avec moins de 100 mm/an de pluies) ;
- sahélo-saharien au centre (100 à 300 mm/an de pluies), domaine du pastoralisme ;
- sahélien au Sud (plus de 300 mm/an), où l'agriculture sous pluies et l'élevage sont pratiqués.

2.2.4.1. Les précipitations

Dans la zone méridionale agro-pastorale, ce climat est caractérisé par une pluviométrie annuelle moyenne de l'ordre de 250 à 450 mm (Ozer, 1998).

Le régime pluviométrique de ce département, unimodal, est marqué par l'alternance d'une saison sèche, pendant laquelle les précipitations sont quasi inexistantes, et une saison des pluies, qui concentre la majorité des précipitations. Ce rythme saisonnier extrêmement stable, varie très peu d'une année à l'autre.

La saison sèche s'étend du mois d'octobre au mois d'avril. La saison relativement humide s'étend sur 5 mois de l'année (de mai à septembre), comprenant une saison des pluies d'une durée de 2 à 3 mois (de juillet à septembre). Durant cette dernière, il tombe plus de 98 % des totaux pluviométriques annuels, avec un maximum au mois d'août (42 % du total des précipitations) (Bodart, 2004 ; Ozer *et al.*, 2005) (Figure 4).

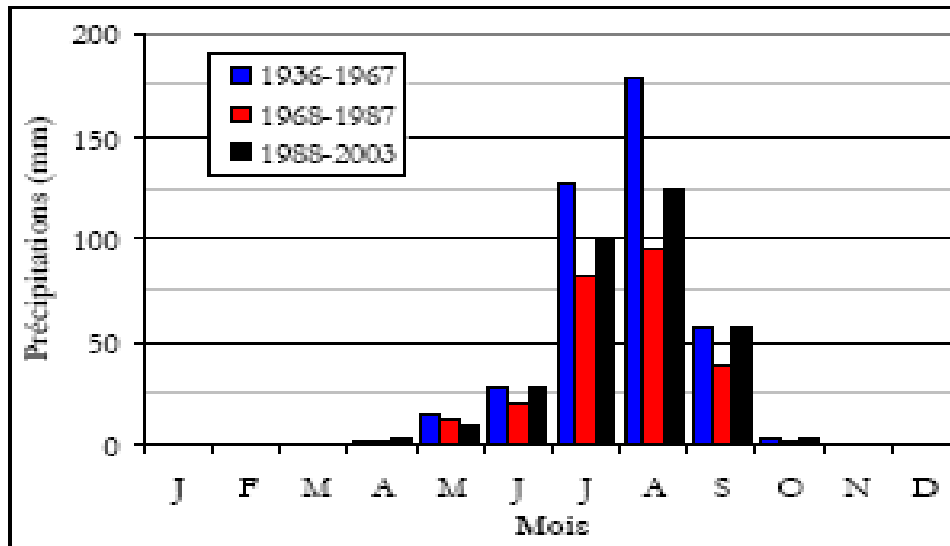


Figure 4 : Répartition mensuelle des précipitations à la station de Gouré (Ozer *et al.*, 2005)

Une autre caractéristique des précipitations, dans cette zone, est leur grande variabilité temporelle. Les travaux d’Ozer *et al.* (2005) sur l’analyse climatique de cette zone illustrent bien cette irrégularité des précipitations. En effet, cette analyse de données pluviométriques de 1936 à 2003 de la station de Gouré a fait ressortir trois périodes, bien distinctes, qui se sont succédé :

- une période humide, de 1936 à 1967, avec une pluviométrie moyenne de 410 mm/an ;
- une période sèche, de 1968 à 1987, avec 248 mm de moyenne pluviométrique par an ;
- et une période intermédiaire, plus humide, de 1987 à 2003, où la moyenne pluviométrique est de 323 mm/an.

Ces changements de pluviométrie s’accompagnent aussi d’une réduction du nombre de jours de pluies. Ainsi, il passe de 50 jours en période humide à 40 jours en périodes sèche et intermédiaire.

L’évolution annuelle des précipitations de 1936 à 2003 pour la station de Gouré est donc très significative. Des grands écarts par rapport à la moyenne et d’une année à l’autre apparaissent clairement au niveau de la Figure 5.

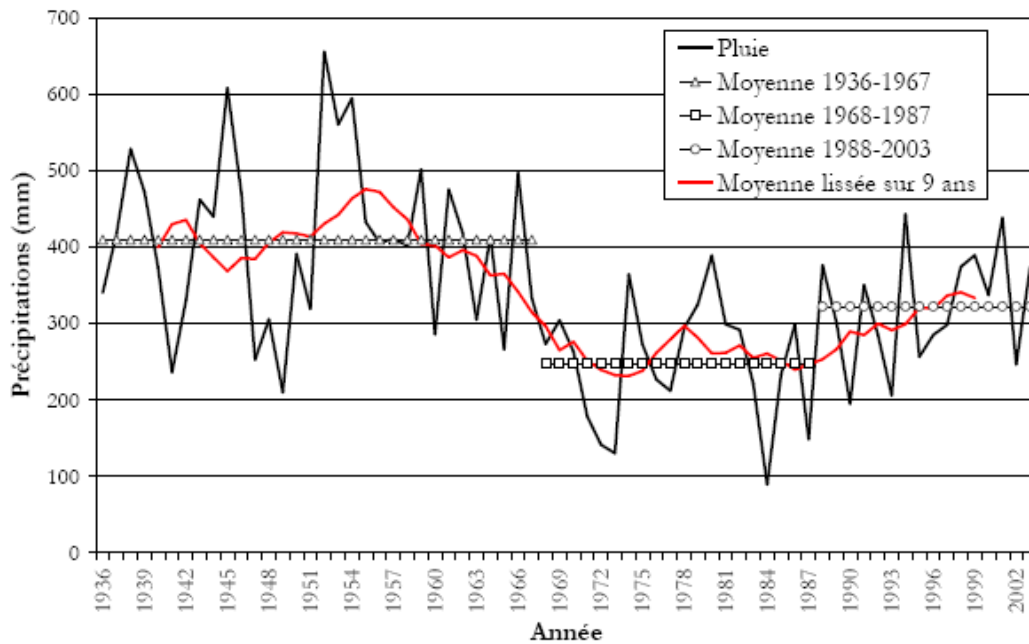


Figure 5 : Précipitations annuelles et moyennes des sous-séries pluviométriques au cours des trois périodes «humide», de «sécheresse» et «actuelle» (Ozer *et al.*, 2005)

Notons aussi que ce retour à des conditions plus humides n'est pas suivi par une amélioration notable de la végétation, probablement à cause de la pression anthropique (Ozer *et al.*, 2005).

L'humidité relative mesurée à la station de Gouré varie entre 26 % en mars (saison sèche) et 94 % en août (saison des pluies) pour les maxima et entre 8 % en avril (saison sèche) et 40 % en août (saison des pluies) pour les minima.

2.2.4.2. Les vents

A l'instar de toute la région orientale du Niger, le régime des vents dans le département de Gouré est caractérisé par deux types de vents. L'Harmattan, alizé de saison sèche, est un vent chaud et sec de direction Nord-Est à Est et la Mousson, alizé de saison humide, qui est un vent frais et humide de direction Sud-Ouest à Ouest.

L'Harmattan souffle durant la période allant de novembre à avril et la Mousson de juin à octobre.

L'analyse des données sur la direction des vents enregistrés à la station météorologique de Gouré pour l'année 1984 (Figure 6) fait ressortir une plus grande fréquence des vents d'Harmattan (48,9 %) par rapport ceux de la Mousson (18,7 %) (Bodart, 2004). Plus récemment, Tidjani (2008) montre que, pour les périodes allant de novembre à mars, tous les vents viennent du cadran Nord-Est à Est, caractéristique de l'Harmattan. Par contre, pour les périodes allant de mai à septembre, les directions restent variables. Cette

variabilité est plus accentuée par les vitesses de vent comprises entre 6 et 10 m/s. Les vents d'Ouest à Soud-Ouest, observés durant ces périodes sont typiques des vents de Mousson.

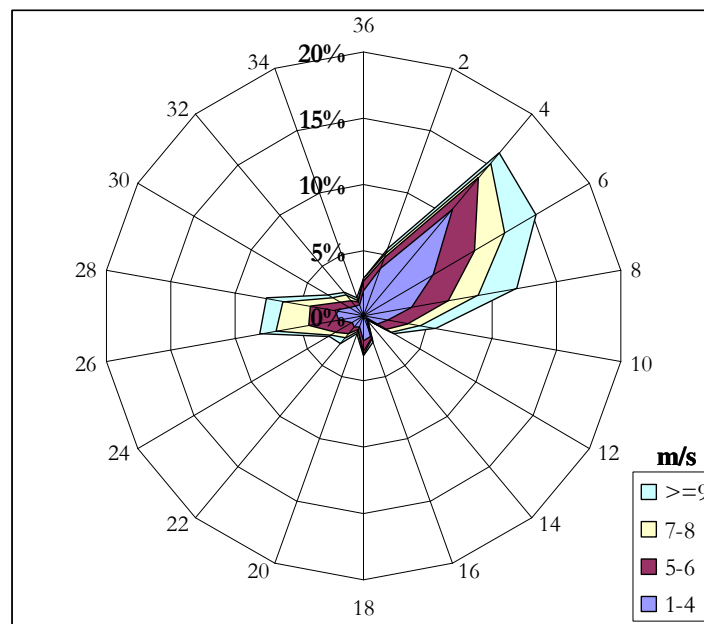


Figure 6 : Rose des vents à la station de Gouré en 1984 (Ozer *et al.*, 2005)

De l'analyse des données de vitesse de vents de 1984 de la même station, Ozer (2000) montrait que la fréquence moyenne des vents efficaces (vent susceptible de provoquer de la déflation) (vitesse ≥ 6 m/s) est de l'ordre de 40 %. Aussi, Ozer et al. (2005) indiquent que 60 % des vents forts (vitesse ≥ 9 m/s) soufflent, essentiellement, du secteur Est à Nord-Est (Harmattan) et, secondairement, 25 % de la direction opposée (Ouest à Sud-Ouest) durant la Mousson. Tidjani (2008) montre que, pour les vents aux vitesses supérieures à 10 m/s apparus pendant cette période, la direction dominante est représentée par le cadran Sud-Est à Est. Ils caractérisent généralement le passage des lignes de grains.

Cette analyse démontre clairement que, dans cette zone, le processus d'érosion éolien peut intervenir pendant n'importe quelle saison, bien que majoritairement observé en saison sèche. Cependant, selon les mêmes auteurs, ces valeurs doivent être considérées comme une moyenne indicative. Il est fort probable que la vitesse du vent efficace varie durant les saisons en fonction du pourcentage de couvert végétal au sol (Fryrear, 1995 ; Lancaster & Baas, 1998 ; Tidjani, 2008), mais également au cours de la journée. En effet, les vents sont plutôt laminaires durant la nuit et beaucoup plus turbulents et tourbillonnaires durant les heures chaudes du jour (Ozer *et al.*, 2005).

On constate une augmentation de la vitesse du vent dans cette région de Gouré. Cette vitesse était inférieure à 5 m/s de 1950 à 1967. Depuis 1967, on enregistre une nette progression de la proportion des vents efficaces, accompagnée par une diversification des directions des vents (Karimoune et Ozer, 1994). Cette augmentation de la proportion des vents efficaces, alors même que la couverture végétale diminue, se traduit par une remobilisation de plus en plus importante de sable et des poussières, causant l'accroissement du nombre des jours de chasse-sable et de brume sèche. Il en résulte une érosion des sols par déflation et des remaniements des sables dunaires, engendrant des modifications morphologiques (Karimoune et Ozer, 1994).

2.2.4.3. Les températures

Dans le département de Gouré, les températures varient au cours de l'année mais restent toujours très élevées. Les moyennes mensuelles sont comprises entre 22 et 36°C. La période la plus chaude va de mars à juin (températures mensuelles minimale et maximale de 26 et 39°C), période pendant laquelle les températures peuvent dépasser 40°C. Les mois les plus froids sont décembre et janvier, avec des minima et des maxima de 16 et 33°C (World Weather Information Service, 2006). L'amplitude thermique annuelle est approximativement de 13°C (Bodart, 2004). Les températures annuelles seraient relativement stables dans le temps (Karimoune, 1994).

2.2.5. L'hydrographie

Le réseau hydrologique du département de Gouré est composé de koris, de mares et de cuvettes.

Les koris sont des cours d'eau temporaires alimentés par le ruissellement des eaux de pluies. Ils prennent naissance dans les versants de massifs et présentent un réseau dense autour de ceux-ci, mais aussi dans les zones à faible couverture sédimentaire.

Leur écoulement dépend des précipitations. Lorsque celles-ci sont abondantes, elles peuvent entraîner des crues brutales dévastatrices et de courte durée, favorisant ainsi la formation de cônes de déjection plus ou moins importants et coalescents.

Les mares naissent dans les dépressions à la surface des couches imperméables. Tout comme les koris, elles sont alimentées par les eaux de ruissellement mais aussi par le sous-écoulement. Elles sont surtout localisées au Centre et au Sud du département et sont généralement temporaires (de 0 à 4 mois). Elles sont aussi de faible profondeur. Sur les 296

mares recensées, seules trois sont permanentes (Kalkalloua, Kangamawa et Maja) et sont aménagées (PGRN, 1997).

Elles servent de point d'abreuvement pour les troupeaux et parfois à la pisciculture (dans le cas de mares permanentes).

Les cuvettes se forment dans les dépressions interdunaires grâce au ruissellement et à la remontée de la nappe phréatique. Elles sont utilisées pour le maraîchage et l'agriculture.

Le département en comptait 900 en 1977 (SAA Gouré, 2000), mais la plupart ne sont pas exploitées en raison des contraintes auxquelles elles sont soumises (ensablement, localisation éloignée, aménagement insuffisant, etc.).

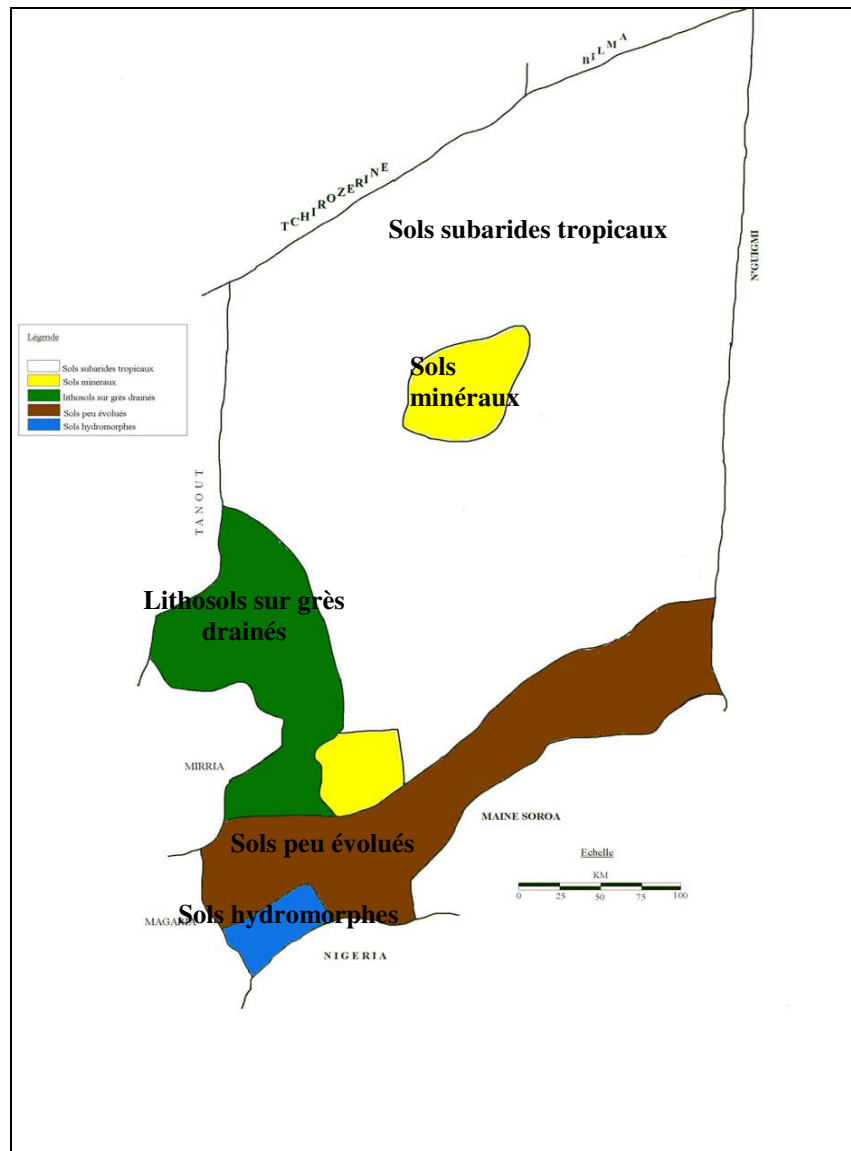
Cependant, la zone est caractérisée par la présence d'une nappe phréatique peu profonde, la nappe du Manga. Elle constitue la principale réserve en eau et est rattachée au système aquifère du lac Tchad. Elle repose sur un socle granitique et se trouve à des profondeurs variables suivant les endroits et les saisons. Son niveau statique est compris entre 0 et 6 m dans les cuvettes et dépressions et peut atteindre 20 à 30 m ailleurs.

Cette nappe est alimentée par les précipitations, qui constituent un apport localisé et temporaire, mais aussi par les déversements en provenance des systèmes aquifères voisins notamment du Nigeria (Arnon, 1990).

Mais, depuis quelque trois décennies, on assiste à un assèchement progressif de nombreuses mares et cuvettes. Cette situation est intimement liée la baisse du niveau de la nappe phréatique résultant de la baisse générale de la pluviométrie. Ces transformations sont flagrantes au niveau des cuvettes. Celles qui sont à eau affleurante deviennent à eau intermédiaire, puis à eau profonde.

2.2.6. Les sols

Les sols du département de Gouré sont tous dunaires, à l'exception de ceux des cuvettes. Ce sont généralement des matériaux d'apport par le vent et par le ruissellement, essentiellement constitués de sols ferrugineux tropicaux non ou peu lessivés et de sols brun rouge subarides sur sables. Ces types de sols sont neutres, rubéfiés (oxydes de fer) mais non lessivés (Gavaud, 1964).



Carte 7 : Typologie des sols dans le Département de Gouré (**Source :** SDP Gouré, 2000)

Selon une étude de Boureima *et al.* (1997), on distingue cinq types de sols dans le département de Gouré (Carte 7) :

- Les sols subarides tropicaux

On les trouve principalement dans les parties les plus arides (Kellé, Tesker, et l'extrême Nord). Ils couvrent plus de deux tiers de la superficie du département.

Ces sols forment le domaine des ergs (sable fin et grossier) où la dégradation très poussée de la végétation, voire sa disparition totale en certains endroits, favorise une érosion éolienne très marquée. Ces sols sont exposés à des conditions climatiques défavorables (moins de 100 mm de pluies par an).

- Les sols minéraux

On les rencontre dans le Monio et à l'extrême Nord (le Koutous). Ils présentent une texture grossière avec un mélange de blocs de granite, de sable et de gravillons.

- Les lithosols

Ces sols se localisent à travers tout le secteur Alakos et se limitent au Sud par des sols peu évolués sur des formations sablonneuses. Ils sont de types sablo – limoneux, pauvres en composés organiques, et ont une vocation pastorale.

- Les sols peu évolués sur formations sableuses

On les trouve dans la quasi totalité de la partie australe du département, de Guidiguir à la limite orientale de Gouré. Ils sont constitués par des sols d'érosion localisés dans la zone rocheuse d'altitude inférieure à 400 m. Ces sols, recevant une pluviométrie plus importante (300 mm) et à fertilité moyenne, sont propices à la pratique des cultures vivrières (mil, sorgho).

- Les sols hydromorphes

Ils occupent une faible superficie et se localisent exclusivement à l'extrême Sud du département, notamment à Gassafa, Bourkou et Abké avec des précipitations supérieures à 300 mm par an. Ces sols, très favorables aux cultures céréalières et maraîchères, ont une texture argilo limoneuse à forte capacité de rétention d'eau.

En général, dans les dépressions interdunaires, où sont localisés les sols hydromorphes, les traces d'hydromorphie disparaissent progressivement vers le Nord. Ceci dénote à la fois d'un gradient d'aridification progressive et d'un approfondissement du niveau piézométrique (Karimoune, 1994).

La texture sableuse des sols de cette zone les rend naturellement sensibles à l'érosion éolienne, qui est aussi accentuée par les sécheresses répétitives qu'a connues la région, associées à l'intensification des activités humaines.

2.2.7. La végétation

Le département de Gouré est partagé en zones agricole, agro-pastorale et pastorale. Le couvert végétal et la composition floristique qu'il abrite ne sont pas homogènes. Ils varient d'une zone à une autre.

D'après l'étude de Boureima *et al.* (1997), on distingue trois zones de végétation différentes dans le département de Gouré :

- la végétation des cuvettes et des anciens lits de rivière

Elle reste dense là où l'exploitation est modérée. Dans d'autres cas, elle est entièrement dégradée.

Partout, la végétation originelle des cuvettes est surtout constituée de palmiers monospécifiques ou d'associations de palmiers tels que *Hyphaene thebaïca* (L.) Mart., *Phoenix dactylifera* L., *Borassus aethiopum* Mart..

Les autres espèces arbustives rencontrées sont : *Acacia tortilis* (Forssk.) Hayne subsp. *Raddiana* (Savi) Brenan, *Faidherbia albida* (Del.) A. Chev., *Acacia nilotica* var. *adansonii*, *Acacia senegal* (L.) Willd. et, en moindre importance, *Acacia seyal* Del., *Acacia sieberana* DC.. Dans de rares cas, on rencontre des espèces comme *Poupartia birrea* (A. Rich.) Hochst, *Tamarix senegalensis* (DC.).

Hyphaene thebaïca et *Acacia tortilis* sont actuellement les espèces les plus abondantes et les plus dominantes dans les cuvettes modérément exploitées.

- La végétation des prairies

Exploitées comme champs de culture et de pâturage, les prairies sont de vastes étendues à végétation arbustive très ouverte et dégradée, suite à l'effet conjugué des sécheresses des deux dernières décennies et à la mauvaise gestion de ces espaces par les populations.

Ces prairies sont couvertes surtout de végétation herbacée, composée principalement de *Cenchrus biflorus* Roxb., *Schoenefeldia gracilis* Kunth, *Pennisetum pedicellatum* Trin.. On y trouve quelques arbres dispersés à faible densité tels que *Acacia albida* Del, *Balanites aegyptiaca* (L.) Del..

Selon les conditions de sol, ces prairies peuvent être couvertes par des populations de *Leptadenia pyrotechnica* (Forssk) ou de *Calotropis procera* (Ait.) Ait.f..

- La végétation des dunes.

L'apport des sables sur les prairies, les cuvettes, et leur façonnement par les vents, provoquent la formation des édifices sur lesquels se maintient ou disparaît la végétation. Le milieu dunaire est, par conséquent, hétérogène et très peu stable.

Selon que l'on se trouve sur les crêtes, les versants, ou dans les espaces inter dunaires, on rencontre des espèces végétales différentes.

Mais cette différence est surtout marquée au niveau de la densité des végétaux observés.

Sur les crêtes, quand elle subsiste, cette végétation est composée de quelques touffes de *Leptadenia pyrotechnica* (Forssk) (Photo 1). Dans certains cas, ce sont les pieds isolés de *Calotropis procera* (Ait.) Ait.f. qui remplacent cette dernière espèce et quelques touffes de *Pergularia tomentosa* L. associées au *Chrozophora brocchiana* Vis.



Photo 1: Vue de la végétation de dunes autour d'une cuvette
(**Source :** Laminou, 2006)

III. TECHNIQUES DE FIXATION DES DUNES

3.1. La fixation des dunes dans le monde

La poussée démographique dans le monde ainsi que la surexploitation des terres arables, la déforestation, le défrichement, l'urbanisation, et les phénomènes météorologiques (effet de serre, réchauffement de la planète, sécheresses, etc.), font que le phénomène de désertification se développe de façon alarmante (Lahlou, 2000). L'avancée des déserts dans les zones marginales est la manifestation directe de la désertification. Selon Lahlou (2000), 25% des terres sont touchées par le phénomène en Australie, 20% en Afrique et en Asie, 10% en Amérique du Sud. L'érosion éolienne constitue l'une des manifestations les plus visibles, avec l'ensablement des terres agricoles et d'infrastructures socio-économiques, de la menace permanente qui pèse sur ces zones. Pour y faire face, plusieurs méthodes de lutte ont été développées de par le monde, dans les zones arides et semi-arides.

Toutes les méthodes de lutte contre la menace éolienne ont pour objectifs de limiter la prise en charge et le transport des particules, de contrôler l'organisation de la distribution du

sable lors de son dépôt et de son accumulation, et surtout de le fixer sur place (Mainguet et Dumay, 2007). On distingue plusieurs techniques de fixation des dunes à travers le monde.

Elles sont groupées sous deux catégories : la fixation mécanique ou primaire et la fixation biologique ou définitive. Ces deux méthodes sont très souvent complémentaires. La fixation mécanique est temporaire et l'installation d'une végétation fixatrice intervient dès qu'une stabilité dans le mouvement du sable est obtenue.

- **La fixation mécanique ou primaire.**

La fixation mécanique a pour objectif de stabiliser, par des moyens mécaniques, les masses sableuses en mouvement, ou d'empêcher la formation de ces masses sableuses sur les infrastructures (FAO, 1988 ; Mainguet et Dumay, 2007). L'édification des palissades, la pose de mulch et la méthode aérodynamique sont les principales techniques utilisées dans la fixation mécanique. Ces techniques constituent le préalable requis à la fixation des dunes mobiles et des dunes nues à court et moyen termes.

1. La technique des palissades consiste en l'édification d'un obstacle linéaire, opposé au vent dominant, pour en diminuer la vitesse et provoquer à son niveau l'accumulation du sable en mouvement. L'objectif de cette technique est donc d'aboutir à la mise en place d'une contre dune. Dans le cas des vents multidirectionnels, le dispositif est complété sur toute la surface par un quadrillage composé d'un réseau de lignes d'arrêt, délimitant entre elles des carrés ou des losanges. Il est confectionné à base du même matériau et selon le même principe que les palissades. Plusieurs matériaux sont utilisés selon leur disponibilité dans la zone d'intervention. Il s'agit des branchages ou des feuilles d'arbres (*Leptadenia pyrotechnica* (Forssk.) Decne., *Calotropis procera* (Ait.) R. Br., *Euphorbia basalmiphera* Ait., feuilles de palmiers etc...), des tiges de mil ou de sorgho (cas des pays du Sahel), des plaques en fibrociment (cas du Maroc) ou de grillage synthétique (cas de la Mauritanie).

2. La technique du mulch consiste à recouvrir le sable d'une couche protectrice aussi uniforme que possible pour supprimer l'action du vent au niveau du sol et empêcher le phénomène de saltation. Plusieurs procédés sont utilisés : le paillage fait à base de paille, d'herbes locales ou de résidus agricoles (cas des pays sahéliens), les films plastiques (cas d'Algérie), les plaques ondulées (cas de la Tunisie), les mèches, les huiles minérales (asphalte, huiles lourdes et huiles brutes) (cas de l'Iran et autres pays pétroliers avec l'épandage des produits dérivés du pétrole).

3. La technique aérodynamique utilise la capacité du transport du vent lorsqu'il atteint une vitesse suffisante pour dégager ou empêcher l'amoncellement du sable. Elle permet, soit d'évacuer des dépôts de sable par des procédés qui accroissent la vitesse du vent au contact de

tels dépôts, soit en profilant les obstacles rencontrés par le vent chargé de sable pour que sa vitesse ne soit pas diminuée à leur contact (cas de la Mauritanie, sous l'appellation de méthode BOFIX) (Meunier et Rognon, 2000). Cette méthode utilise la force de vent et serait plus économique et plus écologique que l'utilisation des énergies fossiles.

- La fixation biologique ou définitive.

La fixation biologique consiste à développer une couverture végétale permanente sur la dune, dont le mouvement du sable est atténué par la fixation mécanique qu'elle complète et consolide (Sissoko, 2006 ; Mainguet et Dumay, 2007). Les plantations et les ensemencements des graines demeurent les principales techniques utilisées dans la fixation biologique de dunes.

1. La technique de plantation : elle comporte plusieurs formes, notamment les brise-vents, les barrières végétales, des ceintures boisées et le reboisement. Les plantations sont réalisées avec des plants élevés en pépinière ou des boutures récoltées sur des sujets sains et vigoureux. La mise en œuvre de cette technique implique la présence d'eau dans le sol, à une profondeur accessible aux végétaux, ou l'arrosage des plants jusqu'à ce que leur système racinaire atteigne les nappes phréatiques (Mainguet et Dumay, 2007).

2. La technique de l'ensemencement : les ensemencements sont réalisés avec des semences d'espèces récoltées localement, soit à la volée (graines légères) ou par poquets (graines lourdes, après prétraitement). L'objectif de cette technique est de couvrir, dans un court délai, les surfaces sablonneuses en favorisant la dissémination des graines sous l'action des vents ou d'inondations, et d'éviter l'arrosage d'appoint. La technique d'inondation a été expérimentée en Chine (UNEP, 2002).

Les techniques de lutte contre l'ensablement se sont beaucoup développées ces dernières années avec l'amplification du phénomène de désertification (Munier et Rognon, 1995 ; Munier et Rognon, 2000). L'évaluation de l'efficacité des techniques de lutte contre l'ensablement est souvent ponctuelle et liée directement aux taux de réussite de chaque opération. Les résultats enregistrés sur le terrain et le niveau de protection assurée aux infrastructures et agglomérations humaines restent ainsi les principaux critères d'appréciation de cette efficacité (FAO, 1993 ; Mainguet et Rognon, 2007). Ils constituent par ailleurs des éléments déterminants du choix des techniques à développer. Il n'est pas rare de trouver une variabilité significative dans les mailles du quadrillage, les espacements entre les palissades et les distances observées par rapport à l'infrastructure à protéger pour des sites présentant des conditions écologiques similaires et pour le même type de modèle éolien. Les résultats demeurent ainsi très variables d'un site à un autre.

Beaucoup de techniques ont donné des résultats très probants de leur efficacité. Les résultats des travaux de Li *et al.* (2006), dans le désert de Tengger en Chine par exemple, constituent une illustration de la réussite de la technique des palissades combinée à la plantation. En effet, de par les résultats positifs de leurs travaux, ces auteurs concluent que l'utilisation de palissades comme « les barrières anti-érosives » et la plantation d'arbustes xérophytiques est un modèle réussi pour empêcher l'ensevelissement, par le sable, d'importantes infrastructures et améliorer la restauration écologique pour l'établissement de la végétation dans des régions arides. Ils ont observé une augmentation du piégeage des poussières dans les systèmes dunaires, un développement de l'horizon de surface du sol dunaire et l'accumulation d'argile et de limon ainsi qu'une amélioration de la teneur en éléments minéraux du sol et de sa capacité de retenue d'eau. Ainsi donc, le succès des techniques des palissades, complétées par la plantation de végétaux adaptés, est traduit par une amélioration dans la formation des croûtes du sol dunaire, dans la réduction de l'érosion éolienne et aussi dans le développement des conditions écologiques du sol pour supporter des végétaux. D'autres succès de ces techniques ont été aussi rapportés par des nombreux auteurs dans d'autres régions arides et semi-arides. Dans les Emirats Arabes Unis, les résultats des travaux de Al-Afifi *et al.* (1990) et de Murai *et al.* (1990), témoignent aussi de l'efficacité de cette technique dans la lutte contre l'érosion éolienne. Ces auteurs ont enregistré des résultats très probants en utilisant des palissades érigées avec des palmes de dattiers, complétées par une plantation d'arbres, ou en établissant un système de quatre brise-vents combinant des lignes d'arbres et des palissades inertes. En Egypte aussi, selon une étude de la FAO (1993), l'édification de palissades autour des parcelles agricoles aurait contribué à une augmentation sensible de la production, de l'ordre de 30 à 100%. Cette même technique aurait également donné des très bons résultats au Maroc dans cadre du projet RAB/89/034 pour la stabilisation des dunes de sable et le reboisement.

Cependant, des cas d'échec ont été aussi observés. En Tunisie par exemple, l'utilisation de cette même technique a connu un échec. La raison de cette différence avec l'expérience marocaine, dans les résultats, était liée à la grande variabilité observée dans la perméabilité des différentes palissades (palissades denses et très peu perméables en Tunisie, d'où une faible résistance aux vents). En plus de la grande variabilité observée dans les conditions et les normes (orientation, positionnement, perméabilité, hauteur etc.) de l'implantation des techniques d'un site à une autre, l'envahissement rapide des dispositifs par l'arrivée des dunes mobiles, surtout lorsque celles-ci proviennent d'un massif dunaire qu'il faut aussi fixer (Munier et Rognon, 2000), constitue une des principales raisons d'échec de ces techniques de

fixation des dunes. De plus, le traitement partiel et incomplet observé sur certains sites expliquerait l'échec de la technique. Les palissades ne jouent que partiellement leur rôle en présence d'importants apports sableux. La disponibilité du matériel végétal utilisé dans la confection des palissades constitue un facteur limitant dans certaines contrées. Une faible disponibilité végétale sur le site de prélèvement pourrait d'ailleurs conduire à une dégradation de la couverture végétale environnante de ce milieu.

D'un autre côté, la technique du mulch présente l'avantage d'annuler le phénomène de déflation, de réduire l'évaporation du sol et d'améliorer la structure du sol par l'apport des matières organiques. L'efficacité de cette technique dépend, en grande partie, de la nature du matériel végétal utilisé. En effet, un matériel léger est facilement emporté par les vents et un matériel grossier facilite le départ du sable, dû aux sifflets (effet venturi) qui se créent entre eux. Ce qui pourrait constituer une insuffisance susceptible d'affecter l'efficacité de cette technique. Le choix des matériaux et leur mise en place conditionnent ainsi le succès de cette technique de mulch.

La technique des plaques en fibrociment, pour l'édification des palissades, ne semble aboutir finalement qu'à des effets très limités et une efficacité relativement faible. Selon une étude de la FAO (1993), cette technique a enregistré moins de 15% de réussite des cas étudiés au Maroc. Les causes en sont la mauvaise orientation par rapport aux vents dominants (absence d'étude préalable de la dynamique éolienne), la fragilité du matériau et la création de tourbillons dus à son opacité. Il est aussi important de noter que les plaques fabriquées à base d'amiante sont reconnues très dangereuses pour la santé humaine.

Selon Munier et Rognon (2000), ces techniques traditionnelles de palissades et de much s'avèrent très efficaces pour faire face aux apports de sable modérés en bordure de cuvettes et autres infrastructures, mais échouent dans des cas des grandes étendues de dunes longitudinales. Les actions de lutte contre l'ensablement demeurent ponctuelles et dispersées et portent souvent sur des cas d'urgence où les fronts dunaires sont devenus menaçants.

Cependant, le phénomène d'ensablement s'amplifie avec les grandes sécheresses devenues plus fréquentes et l'avancée rapide de la désertification. Les déplacements de sable sont devenus plus fréquents et drainent des quantités plus importantes sur des longues distances. C'est pour faire face à ces nouveaux défis que des méthodes dites 'modernes' étaient développées. Il s'agit des techniques aérodynamique, BOFIX, et d'aspersion des dérivés d'hydrocarbures. Malheureusement, ces techniques restent très coûteuses en travail et en argent et ne sont donc accessibles qu'aux pays disposant des capitaux ou d'hydrocarbures.

Elles nécessitent aussi une main d'œuvre spécialisée et des engins spécifiques dans leur mise en œuvre. De plus, bien que traitant des superficies plus grandes que les techniques traditionnelles, elles semblent peu efficaces parce que des nouvelles dunes en migration progressent sur la topographie déjà fixée des dunes précédentes (Munier et Mainguet, 2000). La technique de traitement à base de produits pétroliers n'a pas montré une efficacité certaine dans tous les cas étudiés par la FAO (1993). Elle a l'avantage d'immobiliser le sable et d'empêcher l'évaporation de l'eau du sol par la couche plus ou moins fine constituée par l'épandage. Mais elle présente l'inconvénient d'augmenter la température du sol et d'empêcher tout développement végétal. Ce qui expliquerait son manque de succès.

La technique d'épandage s'est révélée être également très polluante pour l'environnement à cause de l'utilisation des dérivés d'hydrocarbures difficilement dégradables. Quant à la méthode aérodynamique, pour réussir, elle requiert la connaissance d'une technologie appropriée afin de maîtriser les différents paramètres relatifs aux vents et aux mouvements des dunes de sable qui sont nécessaires à sa mise en œuvre. Mais cette technique demeure incomplète et temporaire dans ses effets. Elle ne permet pas une stabilisation définitive et ne s'applique que pour certaines infrastructures, notamment les routes.

Ainsi, au vu de ce qui précède, aucune technique de fixation des dunes ne s'est révélée être totalement efficace. L'efficacité de chacune de ces techniques varie d'un site à un autre et d'un pays à un autre.

La méthode de fixation biologique des dunes présente, elle aussi, selon les techniques, des résultats d'efficacité très variables d'une région à une autre.

Les plantations utilisées comme brise-vents ont fait leurs preuves en matière de stabilisation des dunes dans beaucoup de pays. Au Vietnam, la plantation de l'espèce *Casuarina equisetifolia* L., après un mulching à base de mottes d'herbes, a permis la stabilisation du sable et un début d'évolution biologique sur les dunes trois années plus tard (Dinh, 1998). En Mauritanie (UNEP, 2002), des brise-vents à base d'espèces d'*Euphorbia balsamifera* Ait. a produit des résultats positifs. Des larges surfaces ont été couvertes et des dunes stabilisées.

D'autres exemples de réussite avec des brise-vents furent enregistrés à Jigawa au nord du Nigeria (avec *Azadirachta indica* A. Juss, *Eucalyptus camadelendis* Dehnh.), à Maghta Lahjar en Egypte (avec *Prosopis* sp.), à Ed Debba au Soudan (avec *Prosopis* sp., *Eucalyptus camadelensis*) ou à Thal au Pakistan (avec *Tamarix aphylla* (L.) Karst., *Eucalyptus camadelensis* et *Prosopis cineraria* (L.) Druce) (UNEP, 2002). Ces différents succès s'expliquent par la sécurisation des sites par des clôtures et une mise en défens mais aussi, dans bien des cas, par un arrosage régulier pendant les premiers mois qui avaient suivi la

plantation. Bien que très peu rapportés, des échecs ont également été enregistrés dans les plantations ou ensemencements. Les raisons principales de ces échecs regroupent l'effet des pressions anthropiques (exemples de Pikine et Ualika au Sénégal rapportés par Sougoufara, 1986), la stabilisation défectueuse dès l'origine par l'invasion des plants par le sable, le choix d'espèces végétales inadaptées, les stress hydriques ou minéraux importants, l'effet abrasif des vents etc.

L'échec des opérations d'ensemencement est intimement lié à un déplacement des graines hors du site traité par des vents forts, à une pluviométrie insuffisante ou à une très longue sécheresse. Les graines pourrissent avant de germer ou les jeunes plants s'assèchent à un stade précoce de leur développement. La paille résultante est vite emportée par les vents et le processus d'ensablement reprend son cours.

L'efficacité de la fixation biologique des dunes dépend en grande partie des conditions écologiques du site, du choix d'espèces adaptées, de la plantation, mais aussi de l'entretien et de la mise en défens du site traité. Ces derniers constituent une condition sine qua non pour une véritable réussite de toute opération de stabilisation de dune. Selon FAO (1988), une zone dunaire reboisée depuis moins de trois ans reste extrêmement fragile. En effet, l'entretien et l'instauration d'une protection intégrale contre les pressions de l'homme et du bétail contribuent à augmenter la durée de vie des dispositifs et le développement normal des jeunes plantations. Cette protection permet aussi une réhabilitation de l'écosystème dunaire en favorisant, non seulement, le développement de la plantation artificielle mais, aussi, une végétation spontanée garante d'une fixation définitive. L'entretien et la mise en défens permettent finalement aux dispositifs anti-érosifs et aux plantations de jouer pleinement leurs rôles dans la stabilisation des dunes. Ainsi, pour être réellement efficaces, et en sus du respect de toutes les normes et des paramètres requis pour leur réussite, toutes les méthodes de stabilisation des dunes devraient impérativement intégrer un entretien régulier du dispositif et une mise en défens intégrale du site.

Les techniques de stabilisation de dunes s'inscrivent rarement dans le cadre d'un plan de protection globale préétabli, et déterminé en fonction de la dynamique éolienne et des types de modèles éoliens en présence, prenant en compte aussi bien les sources de sable, les zones de transport et de dépôt que les zones intermédiaires (FAO, 1993 ; Mainguet et Dumay, 2007). Cela constitue une insuffisance commune à beaucoup de pays dans leurs programmes de stabilisation de dunes (UNEP, 2002). Pour être efficaces, toutes les techniques de stabilisation des dunes devraient traiter des surfaces importantes à l'échelle d'un massif dunaire et dans un cadre global. Des études préalables devraient être menées afin de maîtriser

tous les paramètres des processus éoliens et écologiques de la zone, dans le but de définir les meilleurs choix de techniques et matériaux appropriés. Des investissements colossaux et multiformes sont aussi requis pour y parvenir.

3.2. Fixation des dunes au Niger, et plus particulièrement dans la zone de Gouré

Au Niger, le phénomène d'ensablement affecte toute la bande Sud agricole, et plus particulièrement la région située dans le Sud-Est du pays. Dans cette zone, couvrant la région de Zinder (Départements de Tanout et Gouré) et celle de Diffa (Départements de Mainé Soroa et Nguigmi), ce phénomène est plus perceptible et plus inquiétant dans la mesure où l'habitat, les infrastructures routières et la faible portion des terres de cultures encore fertiles sont ensevelis par des dunes de sable ou sont sous la menace de l'être. Toute la lutte contre l'ensablement dans ce pays est concentrée dans cette zone.

Dans le cadre de la lutte contre l'ensablement dans le département de Gouré, des projets, ONGs et programmes de développement (voir liste en annexe II) ont réalisé des opérations de fixation de dunes pour protéger des terres de culture (champs de cultures pluviales et cuvettes) et des infrastructures socio-économiques. Entre la fin des années 1980, période où a véritablement commencé la lutte contre la désertification au Niger, et 2008, quelques 14 projets financés par des institutions internationales, des pays partenaires au développement du Niger, l'Etat du Niger et des ONGs, ont mené des opérations de fixation de dunes sur une superficie totale d'environ 3 500 ha dans le département de Gouré (CNEDD, 1997 ; Rapports annuels d'activités de la Direction Régionale de l'Environnement de Zinder de 1984 à 2008). Bien que la plupart des documents consultés ne renseignent guère sur les impacts écologiques de ces aménagements de fixation des dunes sur le milieu (efficacité de la technique), ni sur des paramètres importants tels que les espèces ligneuses utilisées, le taux de survie des plantations ou sur les enseignements à tirer de leur expérience après exécution, le constat unanime demeure que les résultats de ces réalisations sont très mitigés.

Les handicaps sont essentiellement d'ordre méthodologique et conceptuel aux différents niveaux du diagnostic, de la prospective et de la planification. Ils renvoient particulièrement au choix et à la qualité de la technique ou de l'approche, à l'adaptation des mesures aux conditions locales, à la globalisation et à l'intégration de l'ensemble des mesures dans la zone d'intervention, ainsi qu'à l'implication effective de la population dans tout le processus.

Ainsi, en général, la plupart des projets qui ont réalisé des opérations de fixation des dunes dans le département de Gouré ont commis des erreurs dans la mise en œuvre des différentes

méthodes d'interventions. En matière de fixation mécanique, des paramètres, parmi les plus influents, tels que les dimensionnements des palissades anti-érosives, leur porosité ou la nature même du matériau les composant, diffèrent d'un site à un autre et d'un intervenant à un autre. De plus, le choix des espèces, ainsi que les écartements entre les plants ne répondaient à aucun critère écologique, socio-culturel ou scientifique. Les populations, de leur côté, ne se sont pas pleinement impliquées dans les différents processus de ces opérations. Des erreurs notables dans l'adéquation des surfaces traitées et celles sous menace ont été aussi observées dans beaucoup de zones d'intervention.

Dès la phase préalable de la pose des palissades, on constate, dans la majorité des cas, une défaillance illustrée dans l'orientation même des celles-ci par rapport aux vents dominants. Cela constitue une des erreurs les plus communes à la base de nombreux échecs des opérations de fixation des dunes dans la zone de Gouré. Selon nos propres constats sur des anciens sites, l'orientation des palissades a été très souvent inappropriée par rapports aux directions des vents dominants de la zone.

Généralement, le choix est fonction de l'expérience qu'a le technicien du terrain, mais rarement des données anémométriques. De plus, la porosité du dispositif n'était pas considérée comme un paramètre déterminant de la réussite. Elle dépendait plutôt de l'abondance ou non du matériel végétal de base utilisé : faible dans les cas où ce matériel est abondant, et très grande si celui-ci est assez rare. Un autre problème aussi, observé, concernait les dimensionnements des parcelles. En effet, chaque opérateur définissait ses propres dimensionnements de façon empirique. Les dimensions des parcelles du dispositif varient entre 20 m sur 20 m et 40 m sur 40 m et ne tiennent pas compte de la topographie de la dune, ni de l'ampleur de son avancée.

Pour agir efficacement, il faut connaître les différents mouvements des sables et les mécanismes d'ensablement, la vitesse de déplacement des sables et les phénomènes de transport, les techniques de fixation mécanique et piégeage des sables, la formation et le déplacement des dunes, etc., car ce sont ces données qui déterminent les stratégies d'intervention pour une efficacité accrue. Mais, très rares sont les études qui renseignent sur les impacts écologiques de ces aménagements de fixation des dunes ou qui attestent de leur efficacité.

Les espèces ligneuses fréquemment utilisées dans la fixation biologique de dunes comprennent, entre autres : *Prosopis chilensis* Stunz, *Prosopis juliflora* (Sw.) DC., *Acacia senegal* (L.) Willd., *Acacia nilotica* (L.) Willd. Ex Del. var. *adansonii*, *Acacia tortilis* (Forssk.) Hayne subsp. *raddiana* (Savi) Brenan, *Parkinsonia aculeata* L., *Acacia holosericea*

A. Cunn. Ex G. Don, *Balanites aegyptiaca* (L.) Del., *Ziziphus mauritiana* Lam., *Bauhinia rufescens* Lam. et *Maerua crassifolia* Forssk. (Rapports annuels d'activités de la Direction Régionale de l'Environnement de Zinder de 1984 à 2008). Cependant, dans les opérations de fixation biologique, on note un manque notoire de critères précis dans l'utilisation de ces espèces. Le choix de celles-ci ne tient compte d'aucune compatibilité ou capacité d'adaptation aux conditions écologiques et hydriques de la dune, ni des conditions climatiques de la zone (vitesse de vents, pluviométrie...). L'empirisme reste encore de règle.

De plus, l'utilité socio-économique de ces espèces pour les populations locales est, très souvent, totalement ignorée dans le choix. En conséquence, on assiste à une prédominance de quelques espèces, notamment *Prosopis juliflora* (ou *P. chilensis*) et *Acacia senegal*, qui sont utilisées en plantations monospécifiques. La plupart des opérateurs privés et ONG utilisent l'une ou l'autre des espèces, généralement *Prosopis juliflora* ou *P. chilensis*, dans la fixation biologique, à cause de leur croissance rapide. Quant aux techniciens de l'Etat, ils exécutent la politique de celui-ci en privilégiant, exclusivement et sans discernement, l'espèce d'*Acacia senegal*, dans l'objectif de promouvoir la production de la gomme arabique (cas du Programme Gommier). Cette pratique d'utilisation d'une seule espèce, même en cas de compatibilité écologique avec le milieu dunaire prouvée, présenterait des risques de décimation totale de la plantation, en cas d'apparition d'une maladie.

De même, des espèces allochtones ont été introduites et sont intensément utilisées sans suffisamment d'étapes d'expérimentation préalables. A quelques rares exceptions, l'usage des espèces autochtones reste très limité par rapport à celles introduites. Les espèces *Prosopis juliflora* ou encore *Acacia holosericea* A. Cunn.Ex G. Don. ont été adoptées. Nous pouvons citer l'exemple du projet NER/89/004, un des projets pionniers en matière de lutte contre l'ensablement dans notre zone d'étude. Ce projet avait privilégié l'utilisation des espèces exotiques à hauteur de 65,3 % (dont 36,6 % pour les seules espèces de *Prosopis sp.*) aux dépens des espèces locales (MH/E, 1994).

La plupart de ces espèces utilisées ne survivent pas, à long terme, sur le milieu dunaire. Selon MH/E (1995), au Niger, les taux annuels de survie des plantations demeurent généralement faibles (< 50 % en moyenne). Le taux de mortalité observé des plants est, très souvent, au dessus de 70 %, et atteint parfois 100 %. Par exemple, sur 221 067 plants utilisés dans la fixation des dunes, repartis sur 19 sites, par le PASAM en 2007, seuls 36 % survivaient une année après, avec des disparités allant de 10,8 à 69 % de taux de survie selon les sites (PASAM, 2008). Un autre exemple révélateur de cette mortalité élevée des plants en

milieu dunaire est celui d'une dune à Woro où nous avons constaté, en 2006, l'absence totale d'arbres sur les 3 217 plantés en 1992 par le projet NER/89/004.

On déplore aussi, sur le terrain, l'utilisation d'espèces à croissance lente (espèces indigènes en général), qui seraient moins rustiques et moins adaptées au milieu dunaire (Zabeirou, 1996), ou d'espèces introduites (*Prosopis sp.* et *Acacia holocericea*), qui ne survivent pas aux conditions écologiques de la zone et ne présentent aucun intérêt économique pour les populations.

Un autre handicap majeur à la réussite de la fixation des dunes, dans cette zone, concerne le peu d'intérêt des populations pour ces travaux. Ceci est la conséquence du peu de concertation et d'implication de ces dernières dans le processus par les intervenants, bien qu'elles soient désignées comme les principales bénéficiaires. Dans tout ce processus, les populations semblent être employées plus à titre de main d'œuvre qu'à celui d'acteur ou de partenaire. Elles ne sont pas du tout impliquées dans la conception des programmes, ni dans la prise des décisions et très peu dans l'exécution. Il en résulte un manque d'intérêt notable des populations pour ces opérations menées par les intervenants étrangers. Ce qui limite l'appropriation ultérieure des techniques de fixation des dunes par ces populations et surtout celle des ouvrages réalisés, dont les résultats dépendent d'un suivi et d'un entretien réguliers, qui demeurent également défaillants (MH/E, 1995 ; Ichaou et Guibert, 2009). La plupart des intervenants instaurent une mise en défens et/ou un gardiennage de courte durée (plus ou moins 2 années) du site traité. L'instauration d'une protection intégrale contre l'action de l'homme et des animaux sur ces milieux dunaires traités est une opération importante pour garantir la réussite et la pérennité des plantations.

Cependant, très souvent, ces zones dunaires font office d'aires de pâturages, en saison des pluies quand les champs sont occupés par les cultures et en saison sèche quand les pâturages deviennent rares. Ainsi, on laisse paître tous les animaux du village autour et dans les sites traités. L'effet immédiat est le broutage des jeunes plants des ligneux transplantés, mais aussi du couvert herbacé sorti spontanément à la faveur de l'installation du dispositif. Le broutage des jeunes plants par les animaux, particulièrement les chèvres, demeure une des causes principales de l'échec de la fixation biologique dans ce Département de Gouré, qui est une zone d'élevage par excellence.

D'après les résultats des enquêtes menées par Djambouto (2006), les opérations antérieures de fixation des dunes (par la FAO en 1989 à Woro et SOS Sahel en 1992 à Tchago), qui ont eu lieu dans cette zone ont échoué du fait que les populations n'accordent pas une très grande importance aux espèces utilisées. Selon elles, l'espèce *Prosopis juliflora*,

qui est la plus utilisée pour sa résistance à la sécheresse et son développement rapide, envahit l'espace cultivable des cuvettes et serait la cause de l'abaissement de la nappe dans ces dernières.

Pourtant, ces populations sont conscientes des effets néfastes de l'érosion éolienne. Il ressort des résultats des enquêtes socio-économiques menées, que ces populations semblent être sensibles aux modifications de l'environnement suite aux phénomènes de désertification (Tidjani, A., 2006). Cependant, selon Lawandi (2006), ces populations n'ont entrepris que très rarement des opérations de fixation des dunes. Les quelques initiatives locales ont été réalisées par quelques paysans ou responsables coutumiers autour des jardins ou des villages, des points d'eau menacés. C'est le cas notamment à Guidiguir, où le chef de canton de Gouré a eu à mener des opérations de fixation des dunes et de mise en défens autour de certaines cuvettes. D'après les enquêtes réalisées par Djambouto (2006), les populations de la zone de Gouré adhèrent au principe de la fixation des dunes. Elles acceptent de participer aux opérations de fixation des dunes en prenant en charge l'élevage des plants en pépinière (exception faite de l'espèce *Prosopis juliflora*) et les travaux sur le terrain.

Mais, ces opérations de fixation restent très ponctuelles et très sectorielles, car elles répondent à une situation d'urgence. Elles s'attaquent aux zones les plus touchées par le phénomène d'ensablement. Pourtant, une stabilisation locale et ponctuelle des dunes en mouvement ne fait que résoudre le problème à court terme, limité dans le temps, sans envisager le long terme, qui est le seul à pouvoir garantir une solution durable.

3.3. Technique de fixation des dunes dans la zone d'étude

On distingue trois types de dunes dans le département de Gouré (Toudjani, 1996) :

1. Les barkhanes : Ce sont des dunes en croissant, d'une dizaine de mètres de hauteur, qui progressent rapidement et dont le versant convexe est face au vent dominant tandis que les deux ailes, disposées de part et d'autre d'un axe de symétrie, s'allogent en flèche courbée sous le vent, déterminant une concavité (Mainguet, 1995).

2. Les nebkas : Ce sont des dépôts sableux, de quelques décimètres de hauteur et de 1 à 4 m de long, provoqués par un obstacle (végétation, rochers...) sur la trajectoire des particules en mouvement (FAO, 1988).

3. Les voiles éoliens : Ce sont des fines couches sableuses résultant d'un saupoudrage mince et diffus des particules à la surface du sol (FAO, 1988).

Dans ce département, la principale technique de fixation des dunes se résume à une combinaison séquentielle de fixation mécanique par la palissade à base de branchages de

Leptadenia pyrotechnica et d'une plantation de ligneux, ou très rarement d'un ensemencement des graines d'herbacées, faisant office de fixation biologique.

- **Le clayonnage**

La fixation mécanique consiste en la pose d'une palissade, appelée aussi clayonnage (Photo 2), qui constitue un obstacle linéaire disposé perpendiculairement aux vents dominants (Nord-Est, Sud-Ouest). Son objectif est de réduire la vitesse de vents et de piéger les flux de sable transporté qui s'accumule à sa base, stabilisant ainsi la surface de la dune et permettant une restauration écologique du milieu (restauration du sol et du couvert herbacé).



Photo 2: Vue du clayonnage installé sur la dune de Woro en juin 2005
(**Source** : Laminou, janvier 2006)

La palissade est constituée d'une haie morte à base de branchages de *Leptadenia pyrotechnica* (espèce qui abonde dans cette zone). Le clayonnage peut être simplement périmétral, dans le cas de dune isolée (nebka ou voile éolien). Mais, en général, l'épandage de rachis ou feuilles de palmier dans le clayonnage est utilisé pour ce type de dune.

Dans le cas de barkhanes jointives ou coalescentes, de forme très évolutive (les dunes les plus menaçantes), le dispositif antiérosif est constitué d'un quadrillage croisé (quadrillage

losangique), à cause des vents violents et multidirectionnels qui caractérisent cette zone, ce qui freine ainsi le mouvement de sable entre palissades.

Les dimensions des quadrats ou claies dépendent de la forme du modelé dunaire. Ainsi, au niveau des barkhanes isolées, la fixation mécanique est réalisée par un clayonnage assez lâche et croisé, de type 20 m de long sur 40 m de large, c'est-à-dire des claies posées tous les 40 m, perpendiculairement aux vents dominants, et croisées tous les 20 m. Sur les barkhanes jointives ou coalescentes, de forme très évolutive, le clayonnage est moins lâche et croisé, de type 10 m de long sur 20 m de large ou 20 m sur 20 m.

Le maillage des claies est d'autant plus serré que le vent est plus actif. Il est lâche sur le bas des versants des grandes dunes si leur topographie n'est pas marquée par des rides dunaires vives ; il est dense sur le haut des dunes.

La hauteur de la palissade varie entre 0,5 m et 1,20 m selon la nature du matériel utilisé (FAO, 1988). Cependant, la palissade doit être entretenue par un rehaussement périodique, car la hauteur diminue avec la dégradation physique liée à la décomposition des branchages de *Leptadenia pyrotechnica* et l'accumulation, à sa base, du dépôt de sable transporté par les vents.

De plus, la porosité demeure un facteur essentiel dans l'efficacité d'une palissade. Il est recommandé d'avoir une faible porosité pour assurer une réduction optimale de la vitesse du vent en termes de longueur et d'intensité de protection. Vézina (2001) rapporte qu'une porosité de 40 % réduirait la vitesse du vent de seulement 50 %.

- **Plantation ou ensemencement**

Dans notre zone d'étude, c'est la technique de plantation de jeunes plants des ligneux qui est largement utilisée. Les plants élevés en pépinière sont transplantés, en quinconce, dans les claies, à une profondeur de 30 à 50 cm (selon la profondeur de la première couche d'humidité rencontrée), pour permettre au système racinaire de bénéficier de l'humidité dans la dune et d'éviter le déchaussement.

Les écartements entre les plants varient selon les espèces, le modelé dunaire et le type de protection à réaliser. Au niveau des barkhanes isolées et jointives, les écartements de 3 m x 3 m, 3 m x 4 m ou 4 m x 4 m sont adoptés pour obtenir une couverture rapide du sol. Sur les nebkas et les voiles éoliens, les écartements sont de 4 m x 4 m ou 5 m x 5 m selon que les espèces ligneuses utilisées sont de croissance lente ou rapide. La densité varie généralement de 450 à 600 plants/ha. Le semis direct des graines des ligneux est très rarement utilisé.

L'ensemencement, aussi très peu utilisé dans cette zone, est réalisé avec les semences d'espèces herbacées récoltées localement, à la volée à l'intérieur des claies déjà installées. La

croissance des plants durant l'hivernage permet une bonne couverture du sol, qui le protège des vents violents de l'harmattan. Ce couvert végétal se multiplie de lui-même par la suite à condition que la surface aménagée soit protégée (mise en défens).

IV. LES MYCORHIZES

- Définition et classification

Les mycorhizes, (du grec 'mikès' = champignon et du latin 'rhiza' = racines) sont des symbioses entre les plantes et les champignons du sol. Elles sont très répandues dans la nature. On considère qu'elles concernent 95 % des végétaux. L'union favorise la croissance des deux partenaires.

La colonisation des racines et l'établissement de la symbiose peut débuter à partir de trois sources différentes d'inoculum, généralement appelées les propagules : les spores, des fragments de racines déjà colonisées et le mycélium extra-racinaire.

Les mycorhizes sont classées en trois principaux groupes selon leur organisation morphologique et structurale. On distingue :

1. les ectomycorhizes (du grec « ecktas » = à l'extérieur) qui sont présentes surtout chez les espèces forestières des régions tempérées et de la région boréale. Les champignons développent autour des racines de la plante un manteau fongique visible à l'œil nu. De ce dernier, part un réseau mycélien qui explore le sol. Il se développe entre les cellules corticales de la racine pour former le réseau de Hartig, sans jamais pénétrer les cellules de la racine. Ce type d'association modifie considérablement la morphologie des apex racinaires.

2. les endomycorhizes (du grec « endos » = à l'intérieur) sont présentes chez la plupart des végétaux. Elles sont caractérisées par l'absence de manchon mycélien externe, ce qui les rend invisibles à l'œil nu, et par la pénétration des hyphes fongiques dans les cellules corticales où le mycélium se développe en vésicules ou en arbuscules, d'où l'appellation contractée CMA (champignons mycorhiziens arbusculaires). La morphologie des racines n'est pas modifiée.

Les endomycorhizes sont les plus répandues et vivent en symbiose avec un peu plus de 90 % de taxons végétaux. Elles se retrouvent ainsi sous tous les climats, dans tous les écosystèmes, et ce, indépendamment du type de sol, de la végétation ou des conditions environnementales (Dalpé, 1997).

3. les ectendomycorhizes : formées par des Basidiomycètes. Elles possèdent des caractères qui les rapprochent des deux catégories précédentes : elles présentent un manteau fongique et un réseau de Hartig ainsi que des pénétrations dans les cellules corticales.

Dans le cadre de la présente étude, nous nous sommes intéressés aux endomycorhizes qui sont les mycorhizes plus répandues en milieu tropical, dans lequel se situe notre zone d'étude.

- **Rôles des mycorhizes**

Les champignons mycorhiziens colonisent simultanément les racines et la portion du sol adjacente aux racines en s'y propageant sur plusieurs centimètres sous la forme des filaments ramifiés. Ce réseau d'hyphes filamenteux, greffé aux racines, permet à la plante d'accéder à une plus grande quantité d'eau et de minéraux (phosphore, azote, zinc, cuivre ...) nécessaires à sa nutrition. En échange, le champignon profite des exsudats racinaires (sucres et acides aminés) qui sont indispensables à son métabolisme (Harley et Smith, 1983).

Les mycorhizes permettent à la plante de croître davantage, de fructifier abondamment et aussi d'acquérir une meilleure résistance aux stress environnementaux (Sylvia et Williams, 1992) notamment la sécheresse (Subramanian *et al* ; 1995), le froid (Charest *et al* ; 1993), la salinité (Davis et Yong, 1985) et la pollution (Leyval *et al* ; 1994). De plus, la symbiose tend à réduire l'incidence des maladies radiculaires et minimise l'effet nocif de certains agents pathogènes comme les champignons pathogènes ou les nématodes phytoparasitaires (Dehene, 1982 ; Duponnois et Cadet ,1994).

Le tableau ci-dessous (Tableau 1) résume les différents processus physiologiques améliorés suite à l'infection des plantes par des champignons mycorhiziens.

Tableau 1 : Processus physiologiques améliorés chez les plantes par les mycorhizes.
(Gianinazzi-Pearson, 1982)

Processus physiologique	Type de mycorhizes
Nutrition phosphatée	CMA, ectomycorhizes
Nutrition azotée	Ectomycorhizes
Absorption d'oligoéléments	CMA
Tolérance aux métaux lourds	CMA,
Absorption d'eau	CMA, ectomycorhizes
Production d'hormones	CMA, ectomycorhizes
Fixation biologique de l'azote	CMA
Resistance aux pathogènes	CMA, ectomycorhizes

Certains facteurs comme le pH, la température, l'éclairement, l'humidité, l'aération du sol, la fertilisation et les pratiques culturales peuvent agir sur le processus de la mycorhization. Ces facteurs influencent généralement la capacité d'infection et de

reproduction du champignon, la disponibilité de l'eau et le développement racinaire de la plante hôte, la fixation et la translocation du phosphore.

- **Intérêt des mycorhizes dans la fixation biologique des dunes**

Une colonisation rapide du milieu dunaire par la végétation (ligneuse et/ou herbacée), et son maintien, demeurent le principal résultat recherché dans la fixation de dunes. Malgré l'adaptation de certaines espèces au milieu dunaire, la croissance et le développement de celles-ci sont généralement ralentis par un certain nombre de facteurs inhérents au milieu, notamment le déficit hydrique et minéral (surtout la faible disponibilité du phosphore assimilable), l'instabilité du sol, la présence d'agents pathogènes etc....

L'une des hypothèses que nous avons posées est que la réussite des plantations serait améliorée par une inoculation des plants avec certains champignons mycorhiziens. Dans la nature, l'association des racines avec des champignons mycorhiziens à arbuscules, permet à la plante de surmonter les insuffisances citées précédemment, de réduire la mortalité due au choc de la transplantation et de stimuler sa croissance, tout en lui conférant une résistance aux attaques parasitaires. Selon Gemma et Koske (2002), la capacité de plusieurs espèces de plantes fixatrices de dunes de sable à coloniser celles-ci avec succès dépend de la présence des champignons mycorhiziens arbusculaires (CMA), qui forment des mycorhizes avec les racines des plantes. Leur rôle dans l'alimentation en éléments nutritifs, en particulier le phosphore, et en eau, l'amélioration de la fixation d'azote et de la structure de sol (Haselwandter et Bowen, 1996) les rend particulièrement importants sous les tropiques, où ces facteurs affectent la croissance végétale en de nombreux endroits (Sieverding, 1991). L'utilisation des mycorhizes dans la fixation de dunes améliore les chances de l'établissement de la plantation en augmentant le taux de survie et la croissance des plants (Smith et Read, 1997 ; Degens *et al.*, 1999 ; Perumal et Maun, 1999 ; Hamel et Plenchette, 2007), la résistance des plants au stress hydrique (Davies *et al.*, 1992 ; Subramanian et Charest, 1997), une protection contre certains pathogènes du sol (Diop, 1996) et la stabilisation du sol (Nouaim et Chaussod, 1996 ; Greipsson et El-Mayas, 2000). Ceci est d'autant plus évident quand les sols sont pauvres en éléments nutritifs (Bâ *et al.*, 2000), notamment sous les tropiques.

En Afrique de l'Ouest, des travaux menés antérieurement ont montré que des mycorhizes jouent un rôle majeur sur la croissance, l'alimentation en phosphore et la fixation d'azote des *Acacias* (Diem et Cornet, 1982 ; Ducouso, 1991 ; Guissou, 1994 ; Bâ *et al.*, 1996). Degens *et al.* (1999) soulignent que l'augmentation de la stabilité de particules agrégées, dans un sol sableux, pourrait être largement attribuée au développement des hyphes des champignons mycorhiziens.

Au Niger, les résultats de fixation des dunes demeurent insuffisants. L'association ces micro-organismes symbiotiques de la rhizosphère avec des essences ligneuses fixatrices de dunes, domaine non encore exploré au Niger, pourrait se révéler fructueuse pour la réhabilitation des zones dunaires dans ce pays. C'est pourquoi, dans le cadre de la présente étude, nous avons évalué l'intérêt d'une préinoculation des plants ligneux en pépinière utilisés dans la fixation des dunes.

Comme l'a bien souligné Guissou (1996), l'inoculation n'est bénéfique que si les souches utilisées sont plus compétitives que les souches préexistantes dans le sol. C'est ainsi que les potentialités d'inoculation de la rhizosphère locale ont été d'abord explorées (piégeage et multiplication d'un inoculum indigène). Puis, les effets de cet inoculum sur les espèces adaptées à la fixation biologique de dunes dans la zone ont été comparés à ceux d'un inoculum allogène, en l'occurrence *Glomus intraradices* Schenck & Smith et à la mycorhization naturelle.

Ces inoculums étaient associés au substrat de pépinière non désinfecté.

V. LES ESSAIS

Au regard de notre analyse sur la fixation des dunes dans la zone de Gouré, il apparaît clairement que les principales défaillances sont inhérentes à la barrière physique, le clayonnage, mais aussi au choix des espèces ligneuses utilisées dans la fixation biologique. La restauration écologique d'une dune ne peut se faire qu'avec la stabilisation de celle-ci, via une réduction des flux de sable transportés par les vents. Il est aussi connu que la réussite d'une fixation des dunes requiert une plantation d'espèces correspondant aux conditions écologiques et climatiques de la zone. Les déficits hydrique et minéral du milieu dunaire rendent extrêmement difficile le développement de toute forme de vie végétale. Ailleurs, des études scientifiques ont pourtant montré que ces déficits peuvent être surmontés avec les mycorhizes.

Au Niger, aucune expérimentation scientifique n'a été menée pour explorer ces différents aspects qui pourraient contribuer à la réussite de la lutte contre l'ensablement dans cette zone.

Nos essais comportent donc quatre volets principaux :

1. La mise en place d'une barrière mécanique et l'étude de son influence sur la colonisation naturelle des parcelles ;
2. La sélection d'espèces ligneuses adaptées ;
3. L'étude de la diversité des Glomales des sols de Gouré et la production d'inoculum ;
4. L'évaluation des potentialités de l'inoculation mycorhizienne des espèces fixatrices des dunes.



CHAPITRE II :
MATERIEL ET METHODES

Dans ce chapitre 'Matériel et méthodes', la première partie décrit les matériels et méthodes de base communs à au moins deux essais. En deuxième partie, les matériels et méthodes spécifiques à chaque essai sont présentés.

I. MATERIELS ET METHODES COMMUNS

Sont décrits ci-dessous, successivement : le choix des champs expérimentaux ; le choix des ligneux ; la préparation du substrat de culture de pépinière et le prétraitement des semences.

1.1. Choix des champs expérimentaux : Les cuvettes et les dunes

La cuvette est une dépression topographique interdunaire assez profonde et plus ou moins circulaire présentant une nappe d'eau subaffleurante et peu profonde, un sol riche et une végétation dense (Tychon *et al.*, 2001). Les cuvettes sont localisées dans les dépressions intercalées entre les dunes transversales (points bas de la topographie) mises en place durant les périodes arides du Quaternaire et actuellement fixées par la végétation.

Leur formation remonte à une époque située entre 41 000 et 21 000 ans BP. A cette époque, la nappe phréatique très haute aurait contribué à l'accumulation des dépôts de type alluvial (sédiments argileux) dans les replis inter dunaire.

Ensuite, entre 20 000 et 12 000 ans BP, une période aride aurait entraîné un enfoncement progressif de la nappe phréatique, accompagné, aux endroits où elle affleurerait, par un creusement progressif expliquant la formation des cuvettes (Durand *et al.*, 1978 *in* Jahiel, 1984). Selon Jahiel (1998), ces dépressions auraient pour origine le réseau d'écoulement des nombreux cours d'eau temporaires qui devaient fonctionner il y a 30 000 à 40 000 ans (période pluviale responsable de l'extension du lac Tchad) et entre 9 500 et 6 500 BP (maximum pluvial dénommé le Nigéro-Tchadien).

Leur alimentation en eau est assurée par le sous-écoulement et la remontée de la nappe phréatique. Dans la zone de Gouré, il s'agit de nappes quaternaires (Nappe du Manga à l'Est, nappe des Korama à l'Ouest) qui sont des nappes discontinues qui se localisent dans les alluvions des vallées fossiles ou récentes et dans les formations sableuses (Boureima 1980 *in* Bernus et Hamidou, 1980). Dans le Département de Gouré, environ 900 cuvettes étaient inventoriées en 1977 (SAA Gouré, 2000).

Les potentialités agricoles des cuvettes (Photo 3) varient en fonction de la profondeur de la nappe phréatique, dont le niveau des eaux dépend de l'importance de l'évaporation mais surtout des précipitations.

On remarque une grande variabilité des sols au niveau des cuvettes. Aux sols riches en matières organiques, bien drainés avec une bonne structure, succèdent, vers le centre de la cuvette, des sols hydromorphes et parfois halomorphes.

On distingue trois types de cuvettes suivant la profondeur de la nappe (Jahiel, 1998) :

- les cuvettes à eau profonde (plus de 3 m) : Elles sont exclusivement le domaine des activités pastorales. Elles servent d'aires de pâturage et d'abreuvement de petits ruminants, et souvent de zones de prélèvement de matières premières (palmes et folioles de palmier doum utilisées en sparterie : fabrication de cordes, nattes, tapis, paniers,...). On n'y observe pas d'exploitation permanente.

- les cuvettes à eau intermédiaire (nappe phréatique à 1,5 ou 3 m) : dans ces cuvettes, on pratique des cultures pluviales et irriguées (arboriculture, maraîchage et céréales). Mais l'exploitation agricole reste peu intensive. L'exploitation pastorale est plus importante.

- les cuvettes à eau affleurante ou sub-affleurante (entre 0 et 1,5 m) : C'est le domaine par excellence d'une agriculture diversifiée et intensive dont l'exploitation est permanente. Aux cultures pluviales succèdent des cultures de contre-saison (irriguées).

Les principales cultures de cuvettes sont le maïs, le blé, la patate douce, l'oignon, les dattes, le poivron, la tomate, la laitue, la mangue, le chou, la papaye, etc....



Photo 3 : Vue intérieure de la cuvette de Lafiya
(**Source :** Laminou, 2005)

La végétation de cuvettes est dominée principalement par l'espèce *Hyphaene thebeica* (L.) Mart. et dans certains cas secondairement par *Phoenix dactylifera* L. ou *Borassus aethiopum* Mart.. On y rencontre aussi quelques autres espèces, en nombre réduit, notamment *Bauhinia rufescens* Lam., *Mitragyna inermis* (Willd.) Ktze et *Adansonia digitata* L..

Dans le cadre de cette étude, deux cuvettes ont été choisies pour servir de sites d'expérimentation. Il s'agit des cuvettes de Tchago et de Woro.

Le choix de ces sites était basé sur les principaux critères suivants :

- Distance de la cuvette par rapport à la ville de Gouré ;
- Accessibilité du site ;
- Taille de la cuvette ;
- Degré d'ensablement de la cuvette ;
- Type de mise en valeur de la cuvette ;
- Types d'activités aux environs immédiats de la cuvette ;
- Taille de la population du village exploitant.

1.1.1. La cuvette de Tchago

Localisé entre les longitudes 10°03'39'' et 10°04'06'' Est et les latitudes 14°02'30'' et 14°02'52'' Nord, le village de Tchago est situé à 23 km au Nord-Ouest de la ville de Gouré. Il avait une population de 592 habitants en 2007 (SDP Gouré, 2007) composée majoritairement de Mangas. La principale activité de cette population est l'agriculture (pluviale et irriguée), à côté de laquelle se pratique un élevage extensif. La profondeur de la nappe, observée au niveau de la cuvette, est en moyenne de 4 m.

On y dénombre une dizaine de cuvettes plus ou moins fonctionnelles.

La dune choisie (Figure 7), site d'expérimentation pour l'évaluation de l'efficacité de la fixation mécanique et la sélection naturelle d'espèces fixatrices de dune, est une dune vive et nue située au Nord-Est du village de Tchago. Elle est représentative de la plupart des dunes rencontrées dans la zone. Elle constitue une menace d'ensablement pour le village et une cuvette (agricole) intensivement exploitée, avec une superficie de 1,94 ha. Elle est longue de 247 m et large de 110 m. Cette dune est de type voile éolien évolutif et présente une uniformité morphologique dans toute sa longueur. De plus, elle est totalement et directement exposée aux vents efficaces, d'autant plus qu'aucun obstacle majeur ne contrecarre leurs effets. Ces différentes caractéristiques, communes à la majorité de dunes qu'on rencontre dans cette zone, lui donnent un caractère représentatif et expliquent ainsi son choix comme site d'expérimentation.

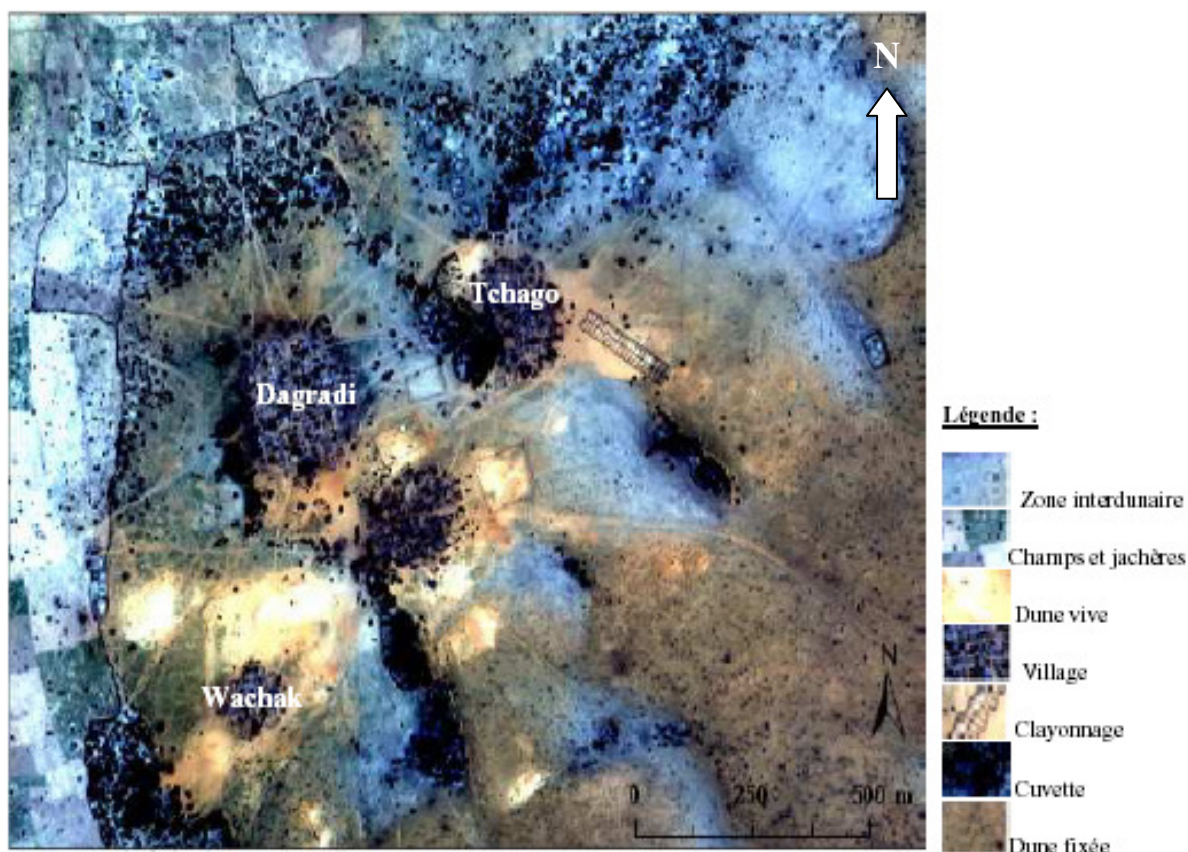


Figure 7: Image satellitaire de la zone de Tchago (Source : Ikonos du 25/07/2005)

1.1.2. La cuvette de Woro

Le village de Woro est situé à 10 km à l'Est de la ville de Gouré et abritait une population de 800 habitants en 2007 (SDP Gouré, 2007), composée essentiellement de Peulhs et d'une minorité de Mangas. L'élevage demeure la principale activité à côté d'une agriculture de subsistance. Le village possède deux cuvettes, dont la principale (notre site d'expérimentation secondaire), de forme allongée, est comprise entre 13°56'56'' de latitude Nord et 10°19'28'' de longitude Est, avec une élévation de 395 m par rapport au niveau de la mer. Elle couvre une superficie de 3,3 ha et est de type à eau profonde (la nappe phréatique se situe à au moins 3 m de profondeur). Elle est à vocation essentiellement pastorale avec quelques petits espaces cultivés (tabac, chou, tomate...).

Cette cuvette a été choisie pour abriter la pépinière (l'élevage des plants) et servir de site pour des mesures morfo-physiologiques. Ce choix était basé sur un certain nombre de critères, notamment la proximité du village par rapport à la ville de Gouré, la présence d'une dune vive et, surtout, par la disponibilité permanente en eau et la présence de pépiniéristes confirmés.

La cuvette de Woro (Figure 8) est surplombée, dans sa partie Sud-Ouest, par une dune vive (sous les vents d'Harmattan), qui ne constitue pas un risque d'ensablement direct de la cuvette. Cependant, les vents de Mousson de direction Sud-Ouest vers Nord-Est pourraient constituer une menace non négligeable. Ceci est d'autant plus vrai en début de saison pluvieuse, quand le couvert végétal est encore relativement peu important et que la faible rugosité pourrait alors augmenter l'efficacité du vent. Cette dune a été retenue comme site d'expérimentation dans l'évaluation des effets de l'inoculation mycorhizienne sur la croissance de ligneux sélectionnés.

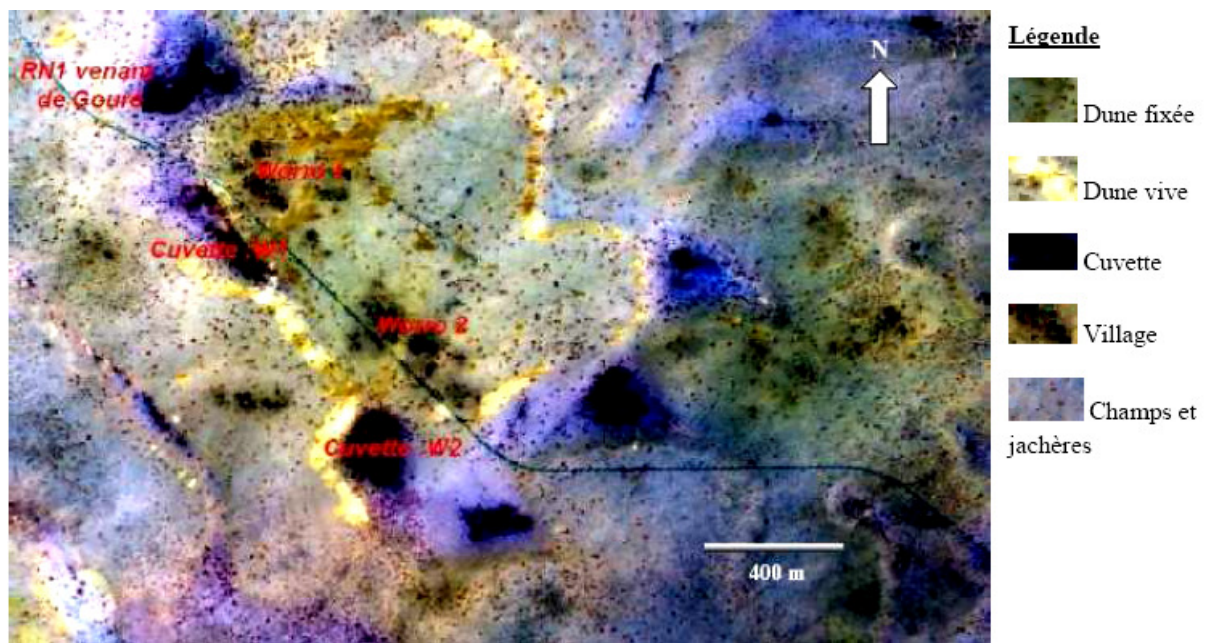


Figure 8: Image satellitaire de la zone de Woro (Source : Ikonos du 11/03/2004)

1.2. Choix des ligneux

Nous avons choisi, a priori, de tester sept espèces ligneuses, indigènes et allogènes. Le choix de ces espèces a été dicté, non seulement, par leur présence dans la zone et leur utilisation courante dans des opérations de fixation biologique de dunes mais aussi, pour certaines, en fonction de leur importance socio-économique pour les populations (Felker, 1981 ; Von Maydell, 1983 ; Bergeret et Ribot, 1990 ; Larwanou, 1994 ; Iktam et Kho, 1996).

Il s'agit de cinq essences indigènes : *Acacia nilotica* (L.) Willd. Ex Del. var. *Adansonii*, *A. senegal* (L.) Willd., *A. tortilis* (Forssk.) Hayne subsp. *raddiana* (Savi) Brenan, (Mimosaceae), *Balanites aegyptiaca* (L.) Del. (Balanitaceae), *Bauhinia rufescens* Lam. (Cesalpiniaceae) et de deux essences allogènes *Prosopis juliflora* (Sw.) DC. et *P. chilensis* Stunz (Mimosaceae).

Ces espèces serviront dans la conduite de deux essais, notamment 'la sélection d'espèces ligneuses adaptées à la fixation des dunes dans la zone de Gouré' et 'potentialités de l'inoculation mycorhizienne des espèces fixatrices des dunes dans la zone de Gouré'.

1.2.1. *Acacia nilotica* (L.) Willd. ex Del. (Mimosacée)



Photo 4 : *Acacia nilotica*
(**Source :** Laminou, juillet 2008)

Acacia nilotica (Photo 4), de la famille des Mimosaceae, est un arbre épineux atteignant 20 m de hauteur, à fût droit cylindrique, à cime dense.

C'est une espèce sahélo-soudanienne répartie du Sénégal au Soudan, en Arabie et en Inde. Elle préfère les sols profonds et supporte une inondation périodique assez prolongée et des températures diurnes de 50°C (Arbonnier, 2002).

Cette espèce est largement utilisée dans la restauration du milieu naturel en zone sahélienne, mais aussi dans des actions de reboisement, de conservation et protection des sols et des eaux (M'Baré, 2001).

Elle fait l'objet d'usages médicaux, pour ses propriétés astringentes. Les racines sont utilisées contre les caries, les infections de la bouche, les inflammations diverses, ainsi que pour la conjonctivite, le scorbut, la blennorragie. L'écorce, réduite en poudre, sert d'hémostatique local

Ajoutons qu'elle possède de nombreux usages « magico-religieux ».

Du point de vue alimentaire, les pousses sont préparées en légumes. L'écorce bouillie est un succédané du café. L'espèce sert aussi à l'alimentation du bétail comme fourrage. Les feuilles et les fruits sont broutés par les ruminants. Le bois entre dans la construction, ainsi que dans la confection des pirogues, de manches d'outils et d'instruments aratoires.

Très riche en tannins, l'écorce est utilisée pour tanner les cuirs (Arbonnier, 2002).

Les fleurs fournissent aux abeilles du nectar et pollen (M'Baré, 2001).

1.2.2. *Acacia senegal* (L.) Willd. (Mimosacée)

Acacia senegal (Photo 5), de la famille des Mimosaceae, est un arbre ou arbuste épineux de 6 à 12 m de haut, à cime étalée et ouverte, à branches très ramifiées, ascendantes.

C'est un arbre typique du Sahel. Il est caractéristique des zones sèches situées au Sud du Sahara, depuis les côtes mauritaniennes et sénégalaises jusqu'à la Somalie. Il pousse sur les sols limoneux légers, bruns argileux, parfois sur lithosols, mais préfère les sols sableux (Arbonnier, 2002).



Photo 5 : *Acacia senegal*
(**Source :** Laminou, juillet 2008)

Acacia senegal convient particulièrement pour une utilisation en agroforesterie. Il joue un rôle important dans la lutte contre la désertification, notamment par son rôle de

stabilisateur des dunes de sable (grâce à son système racinaire traçant très ramifié, assez dense et long - jusqu'à 13 m du pivot-, pouvant drainer l'eau de pluie sur une surface atteignant 500 m²). Il améliore aussi les sols par la fixation de l'azote et l'apport de litière organique.

Cette espèce est très résistante à la sécheresse. Elle survit sous un milieu aux conditions pluviométriques comprises entre 100 et 950 mm et est capable de supporter des périodes de sécheresse d'une durée de 8 à 11 mois (Arbonnier, 2002). *Acacia senegal* tolère également les températures élevées (jusqu'à 45°C ou plus).

Les feuilles et les fruits constituent un fourrage très apprécié par le bétail (M'Baré, 2001 ; Arbonnier, 2002 ; Ickowicz *et al.*, 2005). Ils sont riches en protéines digestibles (10-13 %) et constituent une source importante de fourrage en saison des pluies et au début de la saison sèche (Von Maydell, 1983).

L'importance de sa gomme, la meilleure de toutes celles qui sont commercialisées, lui confère un rôle économique considérable. Elle est utilisée dans l'alimentation (cuisine, pâtisserie, sirops) comme gélifiant et émulsifiant.

Le bois est un excellent combustible et est aussi utilisé dans la construction. L'écorce du tronc ou des racines entre dans la composition des préparations anti-ictériques.

Les fleurs ont une haute valeur mellifère pour les abeilles (M'Baré, 2001 ; Arbonnier, 2002).

Un problème auquel est confrontée cette espèce demeure sa sensibilité aux attaques parasitaires et aux maladies (Colonna *et al.*, 1991).

1.2.3. *Acacia tortilis* (Forssk.) Hayne subsp. *raddiana* (Savi) Brenan (Mimosacée)

Acacia tortilis (Photo 6), de la famille des Mimosaceae, est un arbre moyen de 8 à 15 m de haut, à fût assez court, droit et cylindrique.



Photo 6 : *Acacia tortilis*
(**Source :** Laminou, juillet 2008)

Acacia tortilis est une espèce très intéressante en raison de sa large répartition géographique, de ses capacités de résistance à la sécheresse et de fixation d'azote, et de ses multiples usages traditionnels.

Elle s'étend entre les latitudes 5° et 32° Nord et possède une aire péri-saharienne et moyen-orientale. Elle est caractérisée par une grande plasticité écologique puisqu'elle colonise les régions recevant entre 50 et 1000 mm de précipitations annuelles et situées du niveau de la mer jusqu'à une altitude de 2100 m. *Acacia tortilis* forme des peuplements purs clairs sur des glacis, des sols érodés par l'eau ou le vent. Il prospère spécialement sur les sols alcalins profonds mais aussi sur les sables (Aubreville, 1950).

Cette plante peut être classée parmi les espèces à haut potentiel fixateur d'azote mais à faible rendement. Elle est utilisée dans la fixation de dunes (Von Maydell, 1983), le reboisement (Bernus, 1981) et aussi dans la stabilisation de la fertilité des sols.

Son adaptation aux régions arides est à mettre en relation avec une consommation en eau particulièrement faible et une certaine optimisation du rapport assimilation de CO₂/transpiration mais aussi à la longueur importante du système racinaire (Diouf, 1996 ; Grouzis *et al.*, 1998).

Cette espèce est largement utilisée par les populations locales comme plante médicinale, fourrage, mais aussi comme source d'énergie (charbon), en raison du pouvoir

calorifique élevé de son bois. Ce dernier est aussi utilisé dans l'artisanat pour la confection d'outils et d'ustensiles divers.

C'est une plante qui sert aussi à tanner les peaux et sa gomme est consommée.

Les feuilles, qui restent particulièrement longtemps sur l'arbre, les jeunes rameaux et surtout les fruits mûrs tombant au sol fournissent un précieux fourrage de base pour les animaux domestiques et sauvages (Bernus, 1981).

Les branches épineuses sont utilisées pour les clôtures.

Acacia tortilis joue donc un rôle important dans l'économie rurale. Les fleurs fournissent aux abeilles du nectar et du pollen et la décoction des feuilles aurait des propriétés antipaludiques (M'Baré, 2001).

1.2.4. *Balanites aegyptiaca* (L.) Del. (Balanitacée)

De la famille des Balanitaceae, cet arbre (Photo 7), d'une hauteur de 6 à 8 m, est très commun dans le Sahel et les savanes soudano-sahéliennes, où il est plus connu sous le nom de 'dattier du désert'.



Photo 7 : *Balanites aegyptiaca*
(**Source** : Laminou, juillet 2008)

L'un des multiples avantages de *B. aegyptiaca* est qu'il présente une grande amplitude écologique. Il résiste aux sécheresses périodiques et s'adapte à des variations de précipitations de 250 mm à plus de 1000 mm dans l'année (Hien, 1984).

Cette espèce, peu exigeante sur le plan édaphique, a tendance à devenir abondante en raison, notamment, de ses caractères d'adaptation à la sécheresse et de sa dissémination par les animaux. En effet, les rameaux épineux peuvent assurer la fonction assimilatrice des feuilles, tout en réduisant la surface transpirante et donc les pertes en eau.

L'arbre est utilisé pour des haies vives, contre le vent et l'érosion hydrique. Il s'associe aisément avec la plupart des cultures car son feuillage est peu encombrant.

Balanites aegyptiaca est encore très utilisé sur les plans technologiques (excellent bois de feu, fabrication des manches d'outils, de savon, décontamination des points d'eau), de la pharmacopée (purgatif et contre les icterès, cure-dents) et sur le plan alimentaire, aussi bien pour les hommes que pour les animaux (surtout le fourrage aérien).

Les fruits (dattes sauvages) sont comestibles, et les jeunes rameaux sont utilisés dans les sauces. Les noyaux sont oléagineux.

D'autre part, de nombreuses superstitions sont associées à cette espèce. Citons notamment l'utilisation du fruit dans les mixtures permettant d'assurer l'immunité dans les combats, ou encore le mélange des copeaux de son bois dans les crottes d'éléphants afin de réduire la férocité de cet animal. Par ailleurs les Loranthus, qui poussent sur *B. aegyptiaca*, constituent l'un des ingrédients d'une préparation censée renforcer l'intelligence des jeunes élèves.

Le principal inconvénient de *Balanites* demeure la lenteur de sa croissance, notamment au cours des premières années, ce qui constitue un sérieux handicap pour résister à l'ensevelissement.

Il faut noter aussi que l'effet de déflation observé sous les arbres adultes de cette espèce dans la zone d'étude, provoqué par une canopée trop dense sur un pied élevé, constituerait un facteur défavorable dans l'utilisation de cette espèce dans la fixation des dunes.

1.2.5. *Bauhinia rufescens* Lam. (Césalpiniacée)

C'est un petit arbre, souvent buissonnant, de 3 à 5 m de hauteur, à port caractéristique, dû aux rameaux disposés en arêtes de poisson.



Photo 8 : *Bauhinia rufescens*
(**Source** : Laminou, juillet 2008)

Cette espèce (Photo 8) est répandue dans tout le Sahel et la zone soudanienne voisine, du Sénégal au Soudan moyen en passant par le Nord Ghana, le Niger, le Cameroun et l’Ethiopie. Elle se développe sur sol sec, sableux (jachère), pierreux, argileux et latéritique (Arbonnier, 2002). Ses besoins en éléments nutritifs sont restreints.

Selon une étude de Michels *et al.* (1993) menée en 1991 au centre sahélien ICRISAT (Niger), sur les effets de brise vent de *Bauhinia rufescens* et d’autres espèces âgées de trois ans, il ressort que cette espèce réduit les pertes de terre de 58 %, soit 34 % de plus que *Andropogon gayanus*.

Les feuilles, les rameaux et les fruits (verts ou séchés) de *B. rufescens*, constituent une alimentation de valeur pour le bétail, mais sont aussi utilisés contre la dysenterie, le trouble oculaire, l’hépatite, la variole. L’écorce fournit du tanin.

Cette espèce est également utilisée pour son bois servant de bois de feu et de matériel de clôture.

1.2.6. *Prosopis chilensis* (Molina) Stunz. (Mimosacée)

Arbre épineux toujours vert (Photo 9), de 6 à 8 m de haut ; avec une cime arrondie et étalée.



Photo 9 : *Prosopis chilensis*
(Source : Laminou, juillet 2008)

Originnaire d'Amérique, *P. chilensis* a été largement introduit sous les tropiques. Il est présent au Niger, au Sénégal, au Mali, en Mauritanie,...

On le rencontre jusqu'à 2900 m d'altitude. Il présente un système racinaire relativement profond, ce qui lui permet une tolérance aux zones salées. Il tolère aussi les sols pauvres, mais prospère également dans des sables légers ou des sols rocheux.

Tout comme *Balanites aegyptiaca*, cette espèce se propage facilement grâce à sa dissémination par le petit bétail. Le passage des semences dans leur tube digestif facilite la germination de ses graines qui présentent des téguments épais.

C'est une plante largement utilisée dans l'aménagement des haies vives et la fixation des dunes, à cause de sa grande vitesse de croissance, d'allongement vertical de ses racines et de la forte densité de ses racines superficielles au dessus du collet (rétention de sable) (Meunier et Rognon, 2000).

Ses fruits et ses feuilles sont consommés par les animaux. L'écorce macérée sert en médecine traditionnelle contre les ulcères.

La pulpe sucrée des fruits est consommée par les enfants.

Son bois est utilisé comme bois d'œuvre, bois de feu et aussi sous forme de charbon.

Son principal inconvénient reste l'élimination de la végétation spontanée dans ses alentours mais aussi ses besoins importants en eau, durant la période de démarrage (Meunier et Rognon, 2000).

1.2.7. *Prosopis juliflora* (Sw.) DC. (Mimosacée)

Prosopis juliflora (Photo 10) est une espèce largement répandue au Pérou, en Argentine, au Mexique, en Bolivie et en Colombie. On la retrouve également en Iran, en Inde, en Afrique du Sud et dans bien d'autres pays.



Photo 10 : *Prosopis juliflora*
(**Source** : Laminou, juillet 2008)

Il s'agit d'une espèce à croissance rapide, atteignant une hauteur de 15 m.

P. juliflora convient bien aux climats chauds et secs grâce à son amplitude écologique convenant aux climats sahélien et sahélo-soudanien.

En effet, cette espèce se développe là où les précipitations moyennes annuelles sont comprises entre 150 et 750 mm. *P. juliflora* pousse bien sur les sols sablonneux et rocheux. Cet arbre développe un système racinaire profond (jusqu'à 35 m) lui permettant de chercher l'eau en profondeur.

Selon une expérimentation menée en Mauritanie, il ressort que la plantation des plants élevés en pépinière donne de très bons résultats sans nécessiter un niveau élevé de protection (M'Baré, 2001).

Elle est utilisée dans la fixation de dunes, dans les haies vives et pour obtenir de l'ombrage.

P. juliflora est également utilisé pour son bois de chauffage, le charbon de bois et pour l'alimentation du bétail.

En médecine locale, l'écorce macérée est utilisée comme antiseptique pour le traitement des ulcères.

Prosopis juliflora attire les abeilles par son nectar et son pollen (M'Baré, 2001).

Cette espèce entrave cependant la croissance des herbacées par la concurrence de ses racines et l'allélopathie. Selon la FAO (1988), les espèces de *Prosopis* rentrent en concurrence avec les herbacées par l'intermédiaire de la forte densité des racines superficielles qu'elles développent au collet, leur permettant d'explorer les horizons supérieurs du sol.

1.3. Préparation du substrat de culture en pépinière

Le substrat de culture utilisé dans la production des plants est essentiellement composé du sol prélevé à l'intérieur de la cuvette de Woro, non stérilisé.

Dans la production des plants en pépinière, des pots en polyéthylène, de 20 cm de hauteur sur 9 cm de diamètre, ont été remplis au 4/5 de leur volume avec du substrat de culture non stérilisé, et abondamment arrosés 48 heures avant les semis.

Ce substrat a été utilisé dans l'élevage des plants ligneux dans les essais 'la sélection d'espèces ligneuses adaptées à la fixation des dunes dans la zone de Gouré' et 'potentialités de l'inoculation mycorhizienne des espèces fixatrices des dunes dans la zone de Gouré'.

Après 3 mois de culture, ces pots ont été remplacés par des seaux de 10 litres.

1.4. Prétraitement des semences

Les graines des essences ligneuses utilisées dans ce travail ont été mises à notre disposition par le centre semencier de la Direction Nationale de l'Environnement du Niger. Elles ont été récoltées par les soins de ce centre, respectivement, en 2004 pour les graines des ligneux expérimentées sur le site de Tchago et en 2005 pour celles du site de Woro. Leurs provenances respectives sont reprises dans le Tableau 2.

Les graines des céréales, *Sorghum bicolor* L. Moench (Poaceae) et *Pennisetum glaucum* (L.) R. Br. (Poaceae), et de la légumineuse, *Vigna unguiculata* (L.) Walp. (Fabaceae), utilisées comme plantes-pièges pour les souches de CMA, ont été acquises auprès de l'INRAN de Niamey au Niger et leur collection date de 2005.

Toutes les graines de ligneux ont préalablement reçu un prétraitement (Tableau 2) avant d'être semées.

1.4.1. Les ligneux

Les graines des espèces *d'Acacia tortilis* (Forssk.) Hayne subsp. *raddiana* (Savi) Brenan, *d'Acacia nilotica* (L.) Willd. Ex Del. var *adansonii*, *d'Acacia senegal* (L.) Willd, de *Prosopis juliflora* (Sw.) DC, de *Prosopis chilensis* Stunz, (appartenant à la famille des Mimosaceae), de *Bauhinia rufescens* Lam. (Césalpiniaceae), de *Balanites aegyptiaca* (L.) Del (Balanitaceae) ont servi pour la production de plants en pépinière.

Pour éviter tout risque de contamination et faciliter la germination, ces graines ont subi un prétraitement, qui consistait en un séjour, variable selon les espèces, dans une solution d'acide sulfurique concentrée à 95 % (Tableau 2). Elles ont ensuite été rincées abondamment à l'eau distillée.

Les graines étaient directement semées dans les pots en polyéthylène, de 20 cm de hauteur sur 9 cm de diamètre, à raison de 4 graines par pot.

Tableau 2: Prétraitement des semences (D'après Guissou, 2001)

Espèces	Provenances	Traitement	Durée (minutes)
<i>Acacia tortilis</i>	Gouré	H ₂ SO ₄ à 95 %	10
<i>Acacia senegal</i>	Gouré	//	10
<i>Acacia nilotica</i>	Gouré	//	30
<i>Prosopis juliflora</i>	Gouré	//	10
<i>Prosopis chilensis</i>	Maïné Soroa	//	10
<i>Bauhinia rufescens</i>	Gouré	//	20
<i>Balanites aegyptiaca</i>	Gouré	//	60

Les pots semés ont suivi un régime d'arrosage régulier à l'eau du puits, à raison de deux arrosages par jour (le matin et l'après-midi). Après 3 mois de culture, ces pots ont été remplacés par des seaux de 10 litres.

Les pots ont été disposés par blocs et de façon randomisée au sein de la pépinière.

Tous les plants ligneux, utilisés dans les essais ‘la sélection d’espèces ligneuses adaptées à la fixation des dunes dans la zone de Gouré’ et ‘potentialités de l’inoculation mycorhizienne des espèces fixatrices des dunes dans la zone de Gouré’, ont subi le même traitement décrit ci-dessus.

Au bout d’une dizaine de jours de culture, une plantule était conservée dans chaque pot.

1.4.2. Les plantes-pièges

Comme les graines des ligneux, celles des céréales et de la légumineuse notamment *Sorghum bicolor* (sorgho), *Pennisetum glaucum* (mil) et *Vigna unguiculata* (niébé) ont également subi un prétraitement. Elles ont été désinfectées dans une solution d’hypochlorite de sodium à 12 % pendant une durée de 10 minutes et rincées abondamment à l’eau distillée.

Ici, le substrat de culture utilisé est constitué d’un sol dunaire, prélevé à Niamey, et de vermiculite dans les proportions volumiques de 2 pour 1.

Dans notre cas, la vermiculite est utilisée pour aérer le substrat mais aussi pour corriger l’absence de structure et la tendance à la compaction du sol dunaire.

Le substrat de culture ainsi obtenu est autoclavé à 120°C pendant une heure, deux fois en 48 h, pour éliminer tout risque de contamination par d’autres micro-organismes.

Des pots en plastique de 2 litres, préalablement lavés et désinfectés à l’eau de javel ont été remplis à moitié avec le substrat.

Les couvercles de ces pots étaient perforés en deux points : un orifice de 2,2 cm de diamètre, par lequel les jeunes plantules vont émerger à l’extérieur, et un autre de 1,2 cm de diamètre, pour arroser le végétal via un entonnoir, ont été percés de part et d’autre des couvercles.

Les pots étaient régulièrement arrosés, à la capacité au champ, avec une solution nutritive de Long et Ashton (Furlan, 1981) sans phosphore et diluée à 10 %. L’absence du phosphore augmente les chances de colonisation des racines par les mycorhizes.

Ces derniers étaient disposés sur des tables, à la lumière et à température ambiantes, dans une serre au niveau de l’Université de Niamey.

Les céréales et la légumineuse ont été utilisées dans le piégeage des propagules de l’inoculum indigène (essai sur la diversité des Glomales des sols de Gouré et production d’inoculum).

II. MATERIELS ET METHODES SPECIFIQUES AUX DIFFERENTS ESSAIS

2.1. Essai N°1 : Evaluation de l'efficacité du clayonnage

Dans la station de Tchago, un aménagement a été installé le long de la dune vive méridionale du village en juillet 2004. C'est une dune de type voile éolien. L'objectif de l'essai est d'évaluer l'efficacité de la barrière mécanique à travers le retour de la végétation sur la dune préfixée.

2.1.1. Dispositif de la dune de Tchago : La barrière mécanique

L'expérimentation menée sur cette station avait un double objectif : évaluer l'efficacité de cette barrière mécanique dans son rôle de brise-vent et faire une sélection d'espèces naturellement mieux adaptées aux conditions écologiques de la dune.

Un dispositif expérimental (Figure 9) a été mis en place au niveau de la dune menaçant d'ensablement la principale cuvette de Tchago. Il est disposé le long de la dune face aux vents dominants (direction NNE – SSW).

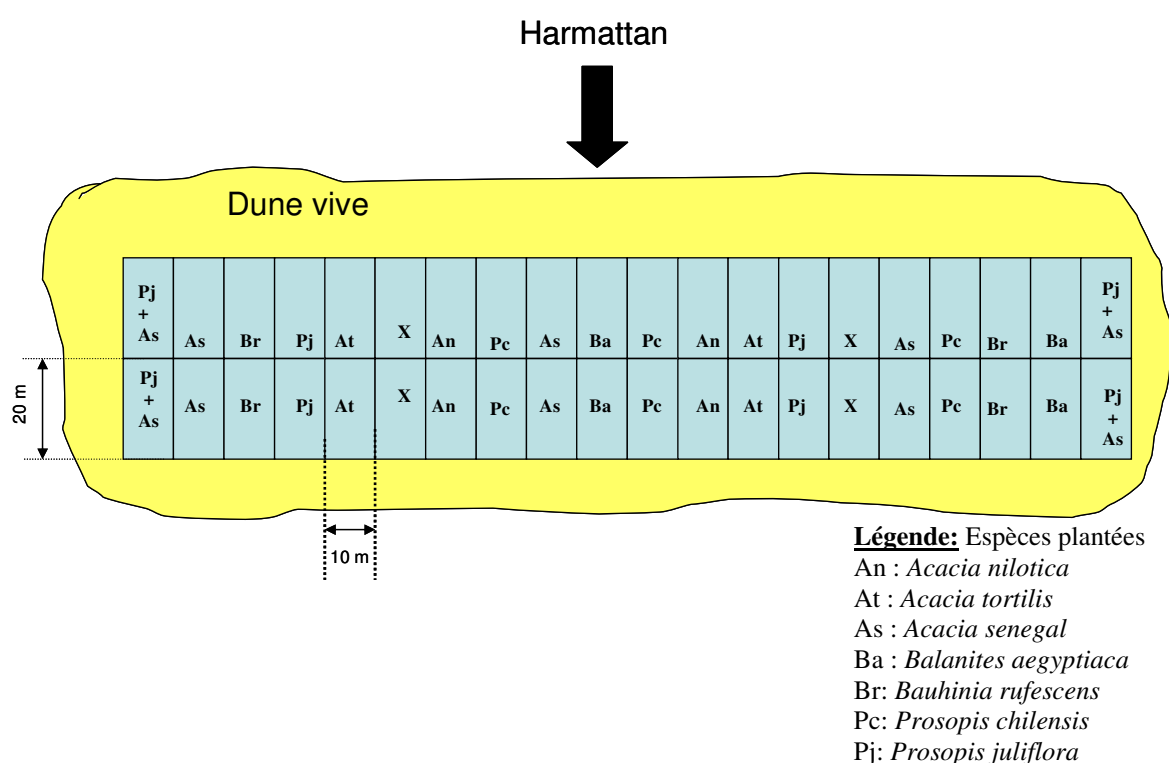


Figure 9 : Dispositif expérimental de Tchago

NB : Les parcelles aux deux extrémités font office de zones tampons et celle de droite a été considérée comme zone témoin de référence. X représente des espèces ne comptant pas dans l'expérimentation.

Il s'agit d'un clayonnage en rectangles, à base de tiges mortes de *Leptadenia pyrotechnica* (*Asclepiadaceae*) de 200 m de long sur 40 m de large et d'environ 1,20 m de hauteur. La porosité originelle moyenne, estimée à partir de 30 mesures était de 9 %. La porosité a été calculée à l'aide du logiciel Photoshop, sur base de 30 images de la palissade prises aléatoirement à partir d'une même distance. Ce logiciel donne le pourcentage de l'espace qu'occupe le vide par rapport à celui occupé par le matériau végétal.

Il est composé d'une série adjacente de 20 parcelles dans sa longueur. Ces parcelles ont chacune 10 m de large x 40 m de profondeur et sont divisées en deux parties égales par une claie interne à base du même matériau.

2.1.2. Dispositif de collecte de suivi de la végétation herbacée

L'efficacité de la barrière mécanique se traduit par une stabilisation du sol et une restauration écologique. Cette dernière est exprimée par le retour de la végétation au sein de la surface de la dune préfixée mécaniquement. Le paramètre mesuré dans l'estimation de l'efficacité du clayonnage est le nombre d'espèces végétales apparues en son sein.

Le dispositif expérimental demeure le clayonnage de Tchago décrit précédemment. Le dispositif de collecte (Figure 10 ci-dessous) comprend trois bandes principales, parallèles à la longueur de la dune, et une bande témoin T utilisée comme référence. Deux bandes A (soumise aux vents d'Harmattan) et C (soumise aux vents de Mousson) sont définies à l'extérieur, de part et d'autre du clayonnage et la troisième bande B constitue l'intérieur du dispositif anti-érosif, le clayonnage. La bande témoin 'référence' est constituée par une double parcelle située à l'extrémité SSE du clayonnage. Il s'agit d'une zone non dégradée, clayonnée, où la végétation pousse naturellement.

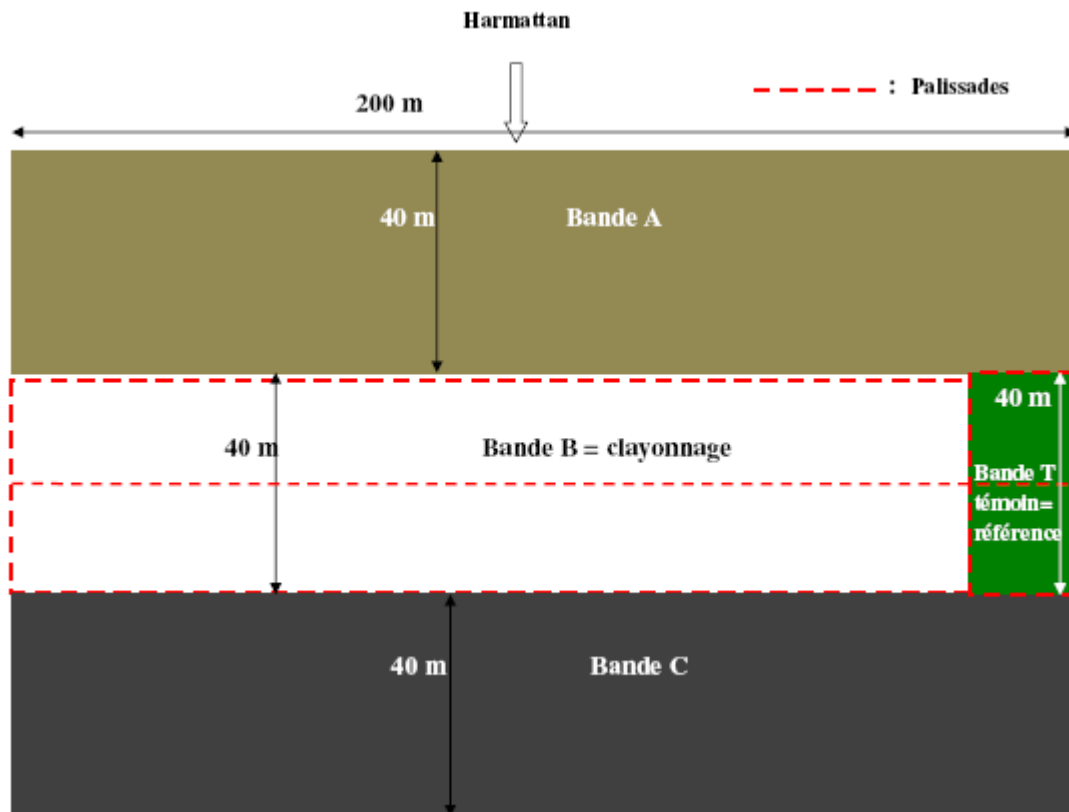


Figure 10 : Dispositif de collecte d'espèces floristiques

Un inventaire exhaustif des espèces végétales a été réalisé dans chacune des bandes et dans la bande témoin 'référence' du dispositif, et répété 3 années de suite, en 2005, 2006 et 2007. L'inventaire floristique a été répété 5 fois par an au cours de la saison des pluies (17 juillet, 24 juillet, 7 août, 17 août et 28 août). La première collecte (17 juillet) intervient après les premières pluies et l'apparition des premières herbes. La dernière (28 août) coïncide avec le maximum de développement de la végétation et la fin de la saison des pluies.

Le recensement annuel avait pour but d'évaluer l'enrichissement ou l'appauvrissement de la diversité floristique au niveau des différentes bandes.

2.1.3. Méthodes d'analyse

Les espèces recensées ont été regroupées par famille. Elles ont été recensées en langues locales (Haoussa et Kanouris) et transcrites par la suite en noms latins à l'aide du lexique des plantes du Niger (De Fabregues, 1979). Les nombres d'espèces et de familles auxquelles appartiennent les herbacées récoltées sont déterminées.

Une analyse de la diversité floristique a été effectuée à l'aide de l'indice de Sørensen (β) (Legendre et Legendre, 1998) pour comparer l'évolution des listes floristiques et apprécier

l'importance du remplacement des espèces au niveau de chacune des bandes et entre les bandes.

L'analyse de la diversité bêta (diversité- β), consiste à comparer la diversité des espèces entre bandes. L'indice de similitude de Sørensen est calculé par la formule :

$$\beta = \frac{2c}{S_1 + S_2}$$

Où, S_1 = le nombre total d'espèces enregistrées dans la première bande,

S_2 = le nombre total d'espèces enregistrées dans la deuxième bande, et

c = le nombre d'espèces communes aux deux bandes.

L'indice de Sørensen de la biodiversité bêta varie de 0, quand il n'y a pas d'espèces communes entre les deux bandes, à 100 %, lorsque les mêmes espèces existent dans les deux bandes.

2.2. Essai N°2 : Selection d'espèces ligneuses adaptées à la fixation des dunes

Dans cet essai, deux dispositifs expérimentaux ont été utilisés : la dune de Tchago et la pépinière.

2.2.1. Dispositif de la dune de Tchago : Plantation d'espèces ligneuses

Le dispositif de base demeure le clayonnage de la dune de Tchago décrit dans la partie 2.1.1 de ce chapitre.

Les plants des sept espèces, *Acacia tortilis*, *Acacia nilotica*, *Acacia senegal*, *Prosopis juliflora*, *Prosopis chilensis*, *Bauhinia rufescens* et *Balanites aegyptiaca*, élevés en pépinière et âgés de 5 mois ont été plantés dans ce clayonnage. Un nombre plus important de plants, que nécessaire, a été produit en pépinière de manière à constituer des groupes homogènes en hauteur pour l'essai. Ces plants n'ont pas subi de traitement particulier.

A l'intérieur de chaque demi-parcelle, les plants, sont espacés de 2 m sur la largeur et de 2,5 m sur la profondeur. On a alternativement 5 ou 4 plants par ligne, en quinconce, pour un total de 36 plants. Les parcelles font l'objet de 2 ou 3 répétitions, suivant les espèces, et sont réparties aléatoirement.

Au niveau de chaque extrémité du clayonnage, des zones tampons de la taille des parcelles sont aménagées et plantées en mélange avec des pieds de *Prosopis juliflora* et *Acacia senegal* en nombre égal, soit 72 pieds par espèce et par parcelle.

Il faut noter que, deux ans après l'installation du clayonnage, une opération de renforcement des palissades et de protection du site a été effectuée à l'aide des branchages d'épineux de *Balanites aegyptiaca* et d'*Acacia tortilis*.

2.2.2. Paramètres suivis

Des mesures de croissance en hauteur ont été effectuées chaque année, durant 3 années successives, sur 10 plants choisis aléatoirement pour chacune des espèces transplantées sur la dune.

La hauteur d'un plant est mesurée à l'aide d'un fil tendu de la base au sommet de ce plant. La longueur du fil est ensuite rapportée sur une règle graduée pour la lecture de la hauteur mesurée.

Le taux de survie a également été calculé chaque année, pendant 3 ans, sur l'ensemble des plants de chacune des espèces. Ce taux est calculé par espèce suivant la formule :
Taux de survie (%) = 100 x [(nombre total des plants survivants)/(nombre total des plants initialement plantés)].

2.2.3. Dispositif de la pépinière

Dix (10) plants de chacune des 7 espèces (*Acacia nilotica*, *Acacia tortilis*, *Acacia senegal*, *Prosopis juliflora*, *Prosopis chilensis*, *Bauhinia rufescens* et *Balanites aegyptiaca*) étaient gardés en pépinière. Les plants ont été disposés en blocs randomisés et arrosés journalièrement, avec de l'eau provenant d'un puits et régulièrement arrosés, deux fois par jour.

Après 12 mois, un stress hydrique par interruption d'arrosage a été appliqué aux plants pendant 6 jours et les mesures d'hydratation ont été effectuées.

L'hydratation exprime la teneur en eau dans les tissus. Son évolution traduit la capacité des plants à limiter les pertes d'eau en dépit du stress hydrique auquel ils sont soumis.

2.2.4. Paramètre suivi

Après une période de 6 jours d'interruption d'arrosage, des feuilles des plants gardés en pépinière sont prélevées et immédiatement pesées pour obtenir le poids frais (PF). Après un séchage au soleil d'une durée de 7 jours, ces feuilles sont à nouveau pesées pour en déterminer le poids sec (PS).

Le taux d'hydratation est calculé selon la formule : $100 \times (PF-PS)/PF$.

2.3. Essai N°3 : Diversité des populations des Glomales et production d'inoculum

- Diversité des populations des Glomales des sols de Gouré

2.3.1. Collecte d'échantillons

Des échantillons de sol ont été prélevés au pied d'arbres des essences étudiées présentes sur des dunes de sable (généralement fixées) autour des cuvettes. Ces espèces regroupent *Acacia nilotica*, *Acacia tortilis*, *Acacia senegal*, *Balanites aegyptiaca*, *Bauhinia rufescens*, *Leptadenia pyrotechnica*, *Maerua crassifolia* Forssk. (Capparacées), *Prosopis juliflora*, *Prosopis chilensis* et *Ziziphus mauritiana* Lam. (Rhamnaceae).

Chacun de ces échantillons de sol était constitué d'un mélange de six prélèvements collectés au pied d'arbres différents de même espèce, pris au hasard. Le prélèvement est effectué dans un rayon de 1 m autour du tronc et entre 0 et 25 cm de profondeur le long des racines. La collecte a eu lieu dans un rayon de 25 km autour de Gouré.

Simultanément à la récolte de sols, des échantillons de racines fines ont été prélevés au niveau des ces mêmes arbres. Ces racines ont été séchées à la température ambiante à l'ombre, puis conservées dans des sachets plastiques.

2.3.2. Extraction des spores

Dans cette étude, les spores ont été extraites suivant la méthode décrite par Walker (1992).

Un échantillon de 100 g du sol prélevé au pied des arbres (cités précédemment) est mis en suspension dans un seau rempli de 500 ml d'eau courante et le mélange agité.

Après une décantation d'environ 20 secondes, la suspension est transvasée dans un autre seau où elle est à nouveau agitée puis laissée au repos pendant une trentaine de secondes.

Puis, le surnageant est passé au travers d'un tamis de 50 μm et le refus contenant des spores recueilli dans un bêcher.

Ce contenu, mis en suspension dans de l'eau distillée, est remué et réparti dans 2 tubes de centrifugeuse. Ces tubes sont centrifugés pendant 4 minutes à 900 G (Tommerup, 1992).

Le surnageant est rejeté et les tubes sont remplis d'une solution de saccharose à 60 %.

Le dépôt est remis en suspension dans cette solution et les échantillons, à nouveau, centrifugés pendant 30 secondes.

Cette méthode de centrifugation, avec du saccharose, permet de concentrer les spores et de réduire les particules de sols et fragments de racines (Tommerup, 1992 ; Khan, 1999).

Enfin, le surnageant est recueilli dans un tamis de 50 µm, rincé rapidement sous un jet d'eau et transféré dans un bûcher avant d'être observé. Les spores sont conservées à 4° C dans une solution de Ringer additionnée d'antibiotiques.

2.3.3. Identification des formes des Glomales

Une tentative d'identification du genre des spores a été effectuée suivant la méthode décrite par Omar *et al.*, (1979) et Schenck et Pérez (1987).

Les spores ainsi isolées ont été placées sous un microscope binoculaire et examinées.

Elles ont été classées selon leur couleur, leur forme (Gerdemann et Trappe, 1974), leur densité et certaines structures caractéristiques, notamment le sac sporifère ou le bulbe suspenseur.

Une fois identifié, chacun des types de spores a été monté entre lame et lamelle dans un milieu PVLG (1,66 g de polyvinylalcool, 10 ml d'acide lactique et 1 ml de glycérol dans 10 ml d'eau distillée) (Omar *et al.*, 1979) sans coloration préalable.

L'identification des espèces de spores a été réalisée sur des examens de spécimens, et des descriptions originales proposées par Schenck et Pérez (1987).

2.3.4. Paramètre suivi : Dénombrement des spores contenues dans le sol

L'estimation du nombre de spores a été effectuée par comptage sous une loupe binoculaire.

5 ml du refus du tamis de 50 µm sont déposés dans une boîte de Pétri et passés sous la loupe binoculaire. L'opération a été répétée 6 fois.

Le nombre moyen de spores est exprimé pour 100 g de sol sec.

L'abondance relative des spores est déterminée (Johnson *et al.*, 1991) comme suit :

$$\text{Abondance relative} = 100 \times \text{NSE}/\text{NSTE}$$

Où NSE = nombre total de spores observées d'une espèce de Glomale et

NSTE = nombre total des spores observées pour toutes espèces confondues.

L'opération de comptage est répétée 3 fois pour chaque échantillon.

- Production de l'inoculum local.

2.3.5. Piégeage des Glomales dans des sols et production de l'inoculum fongique

Dans l'essai de piégeage de différentes Glomales contenues dans les sols récoltés au pied d'arbres de la zone d'étude, la méthode décrite par Walker (1992) a été utilisée.

Cette méthode consiste à cultiver une plante, appelée plante-piège, sur un substrat pauvre en éléments nutritifs, inoculé avec du sol, collecté au niveau d'une station, renfermant des propagules viables (fragments de mycorhizes, spores et hyphes) de CMA devant "infecter" les racines de cette plante-piège.

Les céréales, comme toutes les espèces végétales à système racinaire de type graminioïde, permettent de piéger le maximum de spores dans les échantillons de sols (Johnson *et al.*, 1991 ; Morton *et al.*, 1993). Selon les travaux de Fokom *et al.* (2007), le niébé constituerait une bonne espèce dans le piégeage des spores des champignons.

Schenck et Pérez (1990) et Morton *et al.* (1993) recommandent l'usage d'un substrat de culture pauvre en éléments nutritifs, en particulier en phosphore assimilable (P) et de la vermiculite pour l'aération des échantillons de sols dans le piégeage.

Les variétés utilisées pour le piégeage étaient deux céréales et une légumineuse cultivées localement.

Deux Poaceae, le sorgho (sepon 82) (*Sorghum bicolor* L. Moench) et le mil (CT6) (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.) et une Fabaceae, le niébé (TN-78) (*Vigna unguiculata* (L.) Walp) fournies par l'INRAN de Niamey.

L'inoculum, récolté au niveau de la zone de Gouré, a été conservé dans un sac plastique pour éviter toute contamination et séché à la température ambiante.

L'inoculation a consisté à déposer 200 ml de cet inoculum dans les pots de cultures de 2 litres de contenance remplis à moitié avec du substrat stérilisé, puis d'ajouter la seconde moitié du substrat stérilisé.

Les pots de cultures, pour chacune des plantes-pièges, ont été ainsi inoculés et semés. Le traitement mélange est constitué d'un mélange des échantillons de dix prélèvements de sol. Le témoin était constitué de plante-piège et du sol stérilisé. Il a servi à vérifier l'absence de contamination au cours de l'expérimentation.

Les pots ont été arrosés avec une solution nutritive de Long et Ashton (Furlan, 1981), sans phosphore, diluée au 1/10.

Après cinq mois de culture, les racines de différentes plantes-pièges et les substrats de culture utilisés ont été récoltés. Les racines ont été découpées en fragments d'environ 1cm et mélangées au sol. Le mélange a été séché à la température ambiante pendant 48h et conservé au froid (18°C) dans une chambre.

Dans la production de l'inoculum local, pour chaque culture de plante-piège, un dispositif expérimental complètement randomisé a été mis en place.

Il est de type factoriel où le facteur « Inoculation » comporte 2 niveaux (variété inoculée et non inoculée) et le facteur « traitement » 12 niveaux (10 échantillons correspondant aux sols récoltés au niveau des 10 différentes espèces ligneuses, un mélange de ces 10 sols et un témoin non inoculé).

Pour chacun des trois types de plantes-pièges, le dispositif comprenait 12 traitements avec 3 répétitions, soit 36 pots.

Le dispositif global était ainsi composé de 3 plantes-pièges x 12 traitements x 3 répétitions, soit 108 pots. L'expérimentation a duré 5 mois.

2.3.6. Paramètres suivis

La mycorhization des plants était vérifiée après un traitement des racines au KOH et une coloration au bleu de trypan (Phillips et Hayman, 1970).

Le dénombrement de spores est effectué après leur extraction par tamisage humide sur un gradient de saccharose.

La viabilité a été déterminée sur 100 spores, suivant la méthode de coloration vitale au MTT sigma, développée par An et Hendrix (1988) qui colore les spores viables en brun foncé. L'exercice a été répété trois fois.

Une caractérisation de l'inoculum local ainsi produit a été effectuée. Il a été défini selon les caractéristiques suivantes :

- la longueur moyenne des fragments racinaires (à partir de 100 unités) ;
- le nombre moyen de vésicules par cm (à partir de 100 unités) ;
- le poids moyen de fragments racinaires d'un cm environ (à partir de 100 unités) ;
- le nombre moyen de fragments d'1 cm par 100 ml d'inoculum ;
- et la quantité moyenne de spores par 100 ml du sol (à partir de les pots inoculés).

Les valeurs des trois premières caractéristiques ont été déterminées à partir de la moyenne de 100 unités de fragments de racines pris au hasard. Quant au nombre moyen de fragments, il a été obtenu à partir de la moyenne de trois échantillons de 100 ml.

La quantité moyenne de spores représente la moyenne de tous les pots inoculés.

2.4. Essai N°4 : Potentialités de l'inoculation mycorhizienne des espèces fixatrices des dunes

Dans cet essai, deux sites expérimentaux ont été utilisés : La pépinière et la dune de Woro.

2.4.1. Dispositif de la pépinière

Dans le cadre de cet essai, une pépinière a été installée au niveau de la station secondaire, la cuvette de Woro.

Des plants de cinq espèces présélectionnées, *A. nilotica*, *A. tortilis*, *A. senegal*, *B. rufescens* et *P. chilensis*, ont été produits et inoculés lors des semis.

Ces plants, destinés aux essais de mycorhization sur le site de la dune de Woro et aux mesures physiologiques en pépinière, ont été inoculés avec *Glomus intraradices* Schenck & Smith et l'inoculum indigène (natif) produit, tandis que l'autre partie constituait les témoins. Le substrat de culture est non stérilisé.

L'inoculum *Glomus intraradices* provient de l'INRA de Dijon tandis que l'inoculum natif (complexe de souches) a été isolé et multiplié à l'Université de Niamey.

En pépinière, les plants ont été disposés en blocs aléatoires et arrosés journallement, avec de l'eau provenant d'un puits.

Dans un second temps, les plants de cinq espèces, inoculées lors des semis, ont été transplantées sur le site de Woro pour une partie, l'autre étant gardée en pépinière, sans ombrage, pour des mesures morpho-physiologiques, notamment la croissance en hauteur, le diamètre au collet, le nombre de ramifications, la biomasse totale, l'hydratation (stress hydrique) et le taux de mycorhization (intensité de mycorhization).

L'inoculation de ces espèces a consisté en un apport au substrat de culture non stérilisé, de 100 ml d'inoculum local ou de *Glomus intraradices* placés autour des graines lors des semis dans des pots en polyéthylène, de 20 cm de hauteur sur 9 cm de diamètre (Cordell *et al.*, 1987).

Ainsi, trois traitements différents ont été obtenus :

1. Un inoculum allochtone de *Glomus intraradices* a été fourni par l'INRA de Dijon. Il est constitué d'extrémités de racines de poireau mycorhizées, de spores et d'argile calcinée. L'apport de cet inoculum au substrat de culture non stérilisé constitue le premier traitement dans cet essai et est qualifié de 'traitement *Glomus intraradices*' (GI).

Les principales caractéristiques quantifiées dans 100 ml de cet inoculum allogène sont les suivantes :

- 350 fragments racinaires ;
- 138 vésicules par fragment d'un cm environ ;
- 1,19 cm de longueur moyenne par fragment racinaire ;
- 0,16 mg de poids moyen de fragment racinaire ;

- 306 spores en moyenne.

2. Le deuxième traitement est constitué par l'apport de l'inoculum indigène isolé et multiplié (suivant la méthode de Morton et Walker, 1992) à l'Université Abdou Moumouni de Niamey, au substrat de culture non stérilisé. Cet inoculum est composé des extrémités de racines mycorhizées et de sable contenant des spores. Il est qualifié de 'traitement local' (Lc).

3. Le troisième traitement est constitué du substrat de culture non stérilisé, sans aucun apport, qualifié d' 'inoculum naturel' ou témoin (T).

Le dispositif expérimental, installé en pépinière pour le suivi des paramètres cités précédemment, est de type factoriel à 2 facteurs (Espèce x Inoculation). Le facteur « Espèce » est à 5 niveaux (*A. nilotica*, *A. tortilis*, *A. senegal*, *B. rufescens* et *P. chilensis*) et le facteur « Inoculation » à 3 niveaux (*Glomus intraradices* (GI), Inoculum indigène (Lc) et substrat de culture non stérilisé et non inoculé (T)). Ce dispositif est totalement randomisé et comporte 5 espèces x 3 traitement x 10 répétitions (plants)/traitement, soit 150 plants au total.

Les plants ont été régulièrement arrosés avec l'eau d'un puits, journalièrement, pendant toute la durée de l'expérimentation, soit 20 mois.

A la fin de l'expérimentation, les plants ont été soumis à un stress hydrique par conduite à sec (interruption d'arrosage) pendant 6 jours. Le taux d'hydratation et la masse sèche du matériel végétal de chaque traitement ont été calculés pour évaluer, d'une part, la résistance au stress hydrique et, d'autre part, la production de biomasse totale.

2.4.2. Méthode utilisée de coloration des racines

Dans l'optique d'observations de mycorhizes, les racines fines ont été colorées à la fushine acide selon la procédure développée par Kormanik *et al.* (1979).

Des échantillons de racines fines ont été collectés au niveau des plants du dispositif des plants mycorhizés (et des témoins) gardés en pépinière.

Les racines fines, ainsi récoltées, sont préalablement lavées à l'eau afin de les débarrasser de débris végétaux et du sol.

Ensuite, elles sont réparties dans des flacons en verre et immergées dans une solution de 15 à 20 ml de KOH (10 %). Ces flacons sont placés dans une étuve à 90°C pendant 30 minutes. Si la couleur de la solution du KOH devient très foncée, on la remplace par une nouvelle solution et les flacons contenant les racines sont replacés dans l'étude pour 1 heure.

Les racines peu pigmentées ne subissent qu'un seul passage au KOH pendant 1 heure.

Mais, les racines qui demeurent encore très pigmentées après ce second passage au KOH, sont immergées dans une solution de KOH additionnée d'eau oxygénée (15 ml d'eau + 1 ml KOH + 1 ml d'eau oxygénée à 30 %) pendant 5 minutes au maximum.

Le traitement au KOH permet de vider le contenu cellulaire et rend l'observation sous binoculaire plus facile.

Après cette attaque au KOH, les racines sont rincées à l'eau courante et les flacons les contenant remplis d'eau. Le KOH est neutralisé en ajoutant 2 à 3 gouttes d'acide lactique dans les flacons contenant les racines.

Après cette décoloration, dans les flacons, les racines sont par la suite recouvertes d'une solution de fushine acide (0,05 % dans du lactoglycérol) et passées à l'étuve à 90°C pendant 15 minutes.

La fushine acide permet de colorer en rouge la chitine du champignon.

Les racines sont rincées à l'eau de ville et étalées sur des boîtes de Pétri pour être observées sous binoculaire.

Les racines sont recouvertes avec quelques gouttes de lactoglycérol (1/3 eau + 1/3 glycérol + 1/3 acide lactique) pour faciliter l'observation et la conservation de l'échantillon.

2.4.3. Paramètres suivis

- Taux de mycorhization des racines.

La méthode utilisée est celle de la « gridline » ('gridline intersect method') développée par Giovannetti et Mosse (1980). Elle consiste à quadriller horizontalement et verticalement la surface d'une boîte de Pétri avec un maillage de 1,27 cm de côté. Les fragments de racines, préalablement colorées à la fushine, sont étalés aléatoirement sur cette surface quadrillée et du lactoglycérol y est ajouté.

Toute racine présentant du mycélium ou une (ou des) vésicule (s) à l'intersection avec une ligne, est comptée comme mycorhizée.

La longueur (L) et l'intensité (I) de la mycorhization, exprimées en pourcentage (%) sont automatiquement calculées en fonction des classes de mycorhization à l'aide d'un compteur sous MS DOS développé par l'INRA de Dijon.

$L (\%) = 100 \times [\text{Nombre de fragments colonisés} / \text{Nombre total de fragments observés}]$

$I (\%) = 100 \times [\text{Longueur totale de parties colonisées des segments de 1cm} / \text{Longueur totale de segments observés}]$

De ces 2 variables, l'intensité de la mycorhization est la variable la plus importante car elle intègre non seulement la fréquence des racines mycorhizées mais elle quantifie aussi la masse du CMA dans la racine. Dans cette étude, le taux de mycorhization est assimilé à l'intensité de la mycorhization.

- Biomasse totale.

Les plants ont été soigneusement séparés de la terre et nettoyés. La masse sèche du matériel végétal ou biomasse totale a été déterminée après un séchage à la température ambiante des plants entiers pendant 7 jours et une pesée à l'aide d'une balance électronique sensible (Max : 410 g et d= 0,001).

- La hauteur des plants.

La hauteur des plants a été mesurée selon la procédure décrite précédemment.

- Le taux d'hydratation.

Après une période de 6 jours d'interruption d'arrosage, le taux d'hydratation a été déterminé selon la méthode décrite précédemment.

2.4.4. Dispositif de la dune de Woro : Essai au champ de la préinoculation

Le site de Woro constitue la seconde station d'expérimentation. En pépinière, le substrat, constitué de sol de cuvette, étant de compositions chimique et minéralogique potentiellement plus riches que le sol dunaire, et les conditions hydriques relativement contrôlées du fait d'un arrosage fréquent, les conditions écologiques sont par conséquent différentes par rapport à un site naturel comme la dune. Afin de valider les résultats de nos essais en pépinière, dans des conditions naturelles hydriques et pédologiques de la dune, un essai de mycorhization a été mis en œuvre dans un dispositif anti-érosif à base de branchages de *Leptadenia pyrotechnica*. Ce dernier a été installé sur la dune transversale qui borde le côté Nord-Ouest de la cuvette de Woro.

L'objectif principal, visé par l'expérimentation dans cette station, est d'évaluer et comparer l'efficacité de la mycorhization naturelle des plants dans la fixation biologique de dunes, par rapport à l'inoculation avec des souches indigènes isolées et un CMA allogène, *Glomus intraradices* en milieu réel. Les différents traitements ont été décrits précédemment dans la partie « Pépinière » du présent chapitre.

Les plants inoculés et les témoins non inoculés (*A. nilotica*, *A. tortilis*, *A. senegal*, *B. rufescens* et *P. chilensis*) ont été transplantés sur un cordon dunaire préfixé mécaniquement

par un quadrillage à base de branchages de *L. pyrotechnica* en amont de la cuvette oasienne de Woro.

Le clayonnage (Figure 11) a été installé (en juin 2005) perpendiculairement aux vents dominants de direction NNE.

La zone, de 270 m de large sur 32 m de profondeur et plus ou moins 1,20 m de hauteur, a été divisée en 52 parcelles rectangulaires de 10 m x 16 m. Les plants des différents traitements ont été transplantés dans les parcelles à raison d'un même traitement par parcelle avec des écartements de 3 m x 2 m, soit 18 plants par parcelle.

Au niveau de chaque extrémité du clayonnage, des zones tampons de la taille des parcelles sont aménagées et plantées.

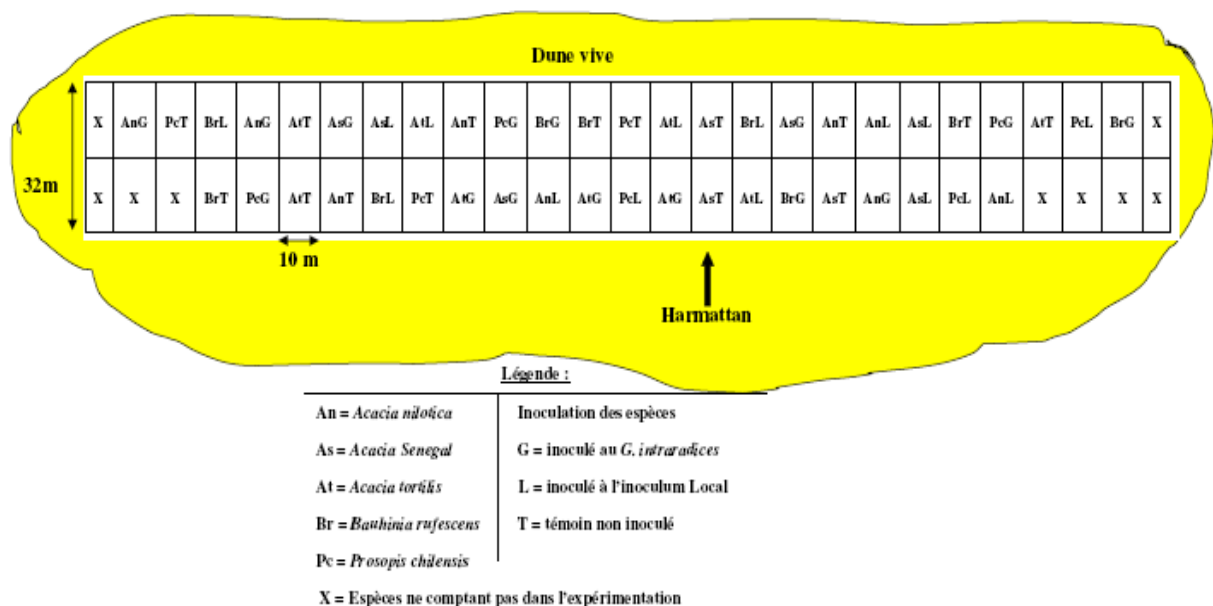


Figure 11 : Dispositif expérimental de Woro

Le dispositif expérimental est de type factoriel à 2 facteurs (Arbre x Inoculation). Le facteur « Arbre » est à 5 niveaux (*A. nilotica*, *A. tortilis*, *A. senegal*, *B. rufescens* et *P. chilensis*) et le facteur « Inoculation » à 3 niveaux (*Glomus intraradices* (GI), Inoculum indigène (Lc) et substrat de culture non stérilisé et non inoculé (T)). Ce dispositif est totalement randomisé et comporte 5 espèces x 3 traitements avec 10 plants/traitement, soit 150 plants au total. L'ensemble des plants présents dans chacune des parcelles n'a pas été pris en compte parce qu'une partie a été endommagée par des animaux.

Les plants ont été suivis pendant une période de 20 mois après la transplantation pour les mesures morphologiques et 3 années pour le taux de survie.

Une année après l'installation des palissades, une opération de renforcement de celles-ci et de protection du site a été effectuée à l'aide des branchages de *Balanites aegyptiaca* et d'*Acacia tortilis*.

2.4.5. Paramètres suivis

- Taux de survie de la plantation.

Après un stress de 6 jours par interruption d'arrosage, le taux de survie a été calculé par espèce et par traitement suivant la formule :

Taux de survie (%) = 100 x [(nombre total des plants survivants)/(nombre total des plants initialement plantés)].

- La croissance en hauteur.

Ce paramètre a été mesuré comme décrit précédemment.

- Diamètre au collet.

La mesure du diamètre au collet des plants a été effectuée selon le même principe que celui de la mesure de la hauteur des plants. Le fil est enroulé autour de la tige au niveau du collet des plants et la longueur rapportée sur une règle graduée pour lecture.

- Le nombre de ramifications.

Le nombre de ramifications des plants a été obtenu par comptage des ramifications au niveau de la tige principale.

III. ANALYSES STATISTIQUES

La normalité de la distribution des données et l'égalité des variances de chaque série des données ont été vérifiées respectivement par le test d'Anderson-Darling et celui de Levene. Dans la mesure où ces conditions étaient satisfaites, il n'a pas été nécessaire d'effectuer des transformations.

Afin de détecter d'éventuelles différences significatives entre les traitements, les variables mesurées ont été soumises à une analyse de variance (test de Fischer) pour les effets simples des facteurs étudiés (espèces ligneuses, inoculation avec de CMA ou stress hydrique) et ceux des interactions entre ces facteurs considérés dans nos différents essais.

Le test de Newman Keuls (au seuil de probabilité $p = 5 \%$) a été utilisé pour les comparaisons des moyennes (LSD) dans le cas où un effet significatif ($p < 5 \%$) ou hautement significatif ($p < 1 \%$) des facteurs considérés aurait été mis en évidence.

Les différentes statistiques calculées sont la moyenne et l'écart type.
Toutes ces analyses ont été réalisées avec le logiciel SAS 9.1.



CHAPITRE III :
RESULTATS ET DISCUSSION

I. EVALUATION DE L'EFFICACITE DU CLAYONNAGE SUR BASE DES RELEVES FLORISTIQUES

1.1. Résultats

Rappelons qu'au moment de la pose du dispositif anti-érosif, en 2004, la dune était nue et vive et soumise à l'ensablement. Aucune espèce végétale ne proliférait alors. Dès la première année après la pose du clayonnage, avec l'installation de la saison pluvieuse, les espèces herbacées (Photo 11) ont commencé à apparaître au sein du dispositif (voir détails des espèces en annexe II).



Photo 11 : Colonisation des claies par des herbacées une année après l'installation
(**Source :** Laminou, août 2006)

Ainsi, en 2005, avec une pluviométrie cumulée de 317 mm, la liste floristique établie par les relevés comprend 18 espèces d'herbacées appartenant à 8 familles différentes dans la bande B (au sein du clayonnage) et 11 espèces regroupées en 8 familles dans la bande témoin T considérée comme référence (Tableau 3). Les bandes A et C sont, alors, toujours nues, sans végétation.

Tableau 3 : Nombre d'espèces recensées dans les bandes A, B, C et T entre 2005 et 2007
(voir les détails sur les espèces en annexe II.)

Famille	Nombre d'espèces floristiques rencontrées	Bande A			Bande B			Bande C			Bande T témoin de référence		
		2005	2006	2007	2005	2006	2007	2005	2006	2007	2005	2006	2007
Poaceae	27		11	11	8	11	23		11	8	3	14	27
Papilionaceae	5	-	2	-	2	3	5	-	2	-	2	3	5
Boraginaceae	1	-	1	-	-	1	-	-	1	-	-	1	1
Convolvulaceae	5	-	2	1	-	4	-	-	3	-	-	-	3
Asclepiadaceae	3	-	1	-	1	2	3	-	2	-	1	3	3
Acanthaceae	3	-	-	-	-	1	2	-	1	-	-	1	3
Amaranthaceae	5	-	2	-	-	2	-	-	1	-	1	3	5
Cyperaceae	3	-	2	-	1	2	2	-	2	-	1	2	2
Rosaceae	1		1	1		1	1	-	1	1	-	1	1
Commelinaceae	2	-	2	-	-	2	2	-	2	-	1	2	2
Capparidaceae	1	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	1	1
Tiliaceae	1	-	1	1	-	1	1	-	-	1	-	1	1
Combretaceae	2	-	1	-	1	-	2	-	-	-	-	1	2
Cucurbitaceae	5	-	4	-	3	4	3	-	4	3	1	2	4
Aizoaseae	1	-	1	1	-	1	1	-	1	-	-	-	1
Liliaceae	1	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	1	1
Zygophyllaceae	1	-	1	-	-	1	1	-	1	-	-	1	1
Menispermaceae	1	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	1
Salpiniaceae	1	-	1	-	1	1	1	-	-	-	-	-	1
Molluginaceae	1	-	-	-	-	1	1	-	1	-	-	1	-
Caesalpiaceae	2	-	-	-	-	-	2	-	-	-	-	2	2
Euphorbiaceae	3	-	2	-	-	2	3	-	-	-	1	-	3
Cyperadeae	2	-	-	-	-	-	2	-	2	2	-	2	2
Polygalaceae	1	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Pedaliaceae	1	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-
Total	79	0	35	16	18	40	58	0	35	15	11	42	71

Mais, dès la deuxième année (2006 avec 299 mm de pluies), la végétation apparaît dans toutes les bandes du dispositif. La Figure 12 illustre, en nombre, l'évolution annuelle des espèces d'herbacées au sein du dispositif durant les trois années d'expérimentation (voir détails des espèces en annexe III).

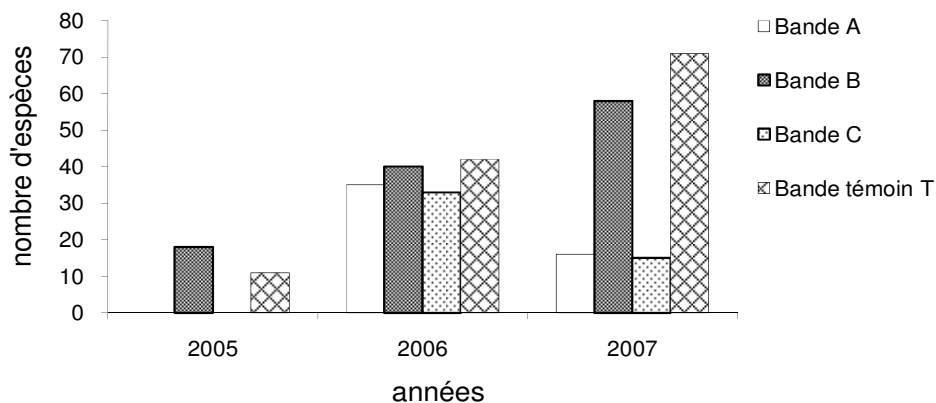


Figure 12: Evolution annuelle du nombre d'espèces floristiques recensées

NB : Les diagrammes représentent la somme des espèces recensées dans les bandes au cours des cinq prélèvements (17 juillet, 24 juillet, 7 août, 17 août et 28 août) pour chacune des années.

Au fil des 3 années d'étude, à la faveur d'une pluviométrie normale, l'enrichissement au sein du clayonnage (bande B) se traduit par une augmentation du nombre d'espèces et de familles floristiques, en majorité des annuelles.

Ainsi, en 2006, 40 espèces végétales ont été recensées, dont 12 pérennes (soit 30 %), regroupées en 17 familles et, en 2007 (254 mm de pluies cumulées), 58 espèces (dont 17 pérennes, soit 29 %) ont été dénombrées et réparties dans 20 familles.

A l'instar de la bande B, la bande témoin T protégée a connu aussi un enrichissement en espèces végétales et en familles. En 2006, 42 espèces (incluant 13 pérennes, soit 31 %) sont recensées pour 18 familles et, en 2007, 71 espèces (20 pérennes, soit 28 %) appartenant à 22 familles sont dénombrées.

Par contre, les bandes externes A et C, non protégées, ont connu une régression en nombre d'espèces et de familles entre 2006 et 2007 : 19 espèces (dont 7 des 11 pérennes), représentant 11 familles, et 20 espèces (dont 5 des 9 pérennes), représentant 11 familles, ont disparu respectivement des bandes A et C.

Mais l'enrichissement observé au cours de ces 3 ans d'études cache des fluctuations. En effet, certaines espèces, apparues une année, disparaissent l'année d'après et des nouvelles les remplacent. Au niveau du clayonnage, l'enrichissement constaté en 2007 s'est traduit par l'apparition de 25 nouvelles espèces, dont 4 nouvelles familles (Menispermaceae, Liliaceae, Caesalpiniaceae et Capparidaceae), et par la disparition de 7 espèces, dont 2 familles (Boraginaceae, Amarantaceae). L'apparition de ces 4 nouvelles familles a été aussi observée

au niveau de la bande témoin T en 2007, alors que les autres espèces nouvelles apparues en 2007, au niveau de la bande B, étaient déjà recensées en 2006 au niveau de la bande témoin T.

L'analyse de la diversité montre que le clayonnage (bande B) et la bande témoin, T ont évolué, chacun, vers des listes floristiques assez comparables entre 2006 et 2007 (Figure 13). Dans ces deux zones, on assiste à une stabilisation de la composition floristique. En effet, le remplacement des espèces n'a pas été important au cours des deux dernières années, contrairement aux bandes A et C non protégées.

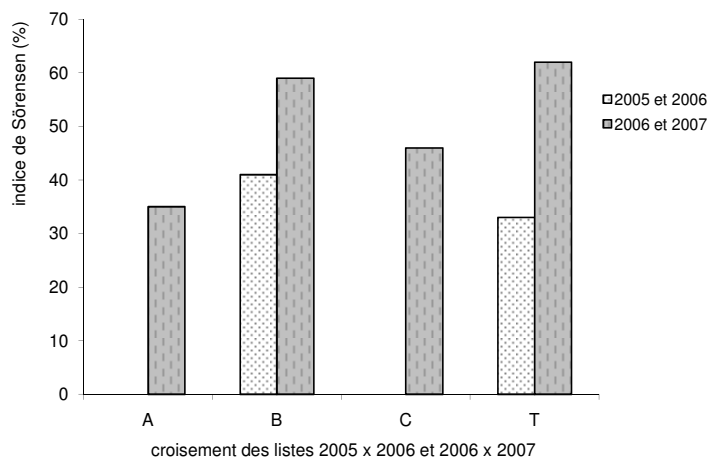


Figure 13: Evolution de la diversité bêta dans les bandes de 2005 à 2007

NB : Les diagrammes représentent la somme des espèces recensées dans les bandes au cours des cinq prélèvements (17 juillet, 24 juillet, 7 août, 17 août et 28 août) pour chacune des années.

Cette stabilité floristique est aussi illustrée par l'évolution de la diversité entre les bandes. Bien que l'analyse doit être réalisée avec prudence car la bande T est de superficie moindre que les trois autres, la Figure 14 montre que les zones protégées (bandes B et témoin T) ont un taux de similitude de composition floristique très élevé et quasi stable sur les deux dernières années, alors que ce taux est en forte baisse dans le cas des zones non protégées (bandes A et C) (voir annexe II. pour les détails sur les espèces).

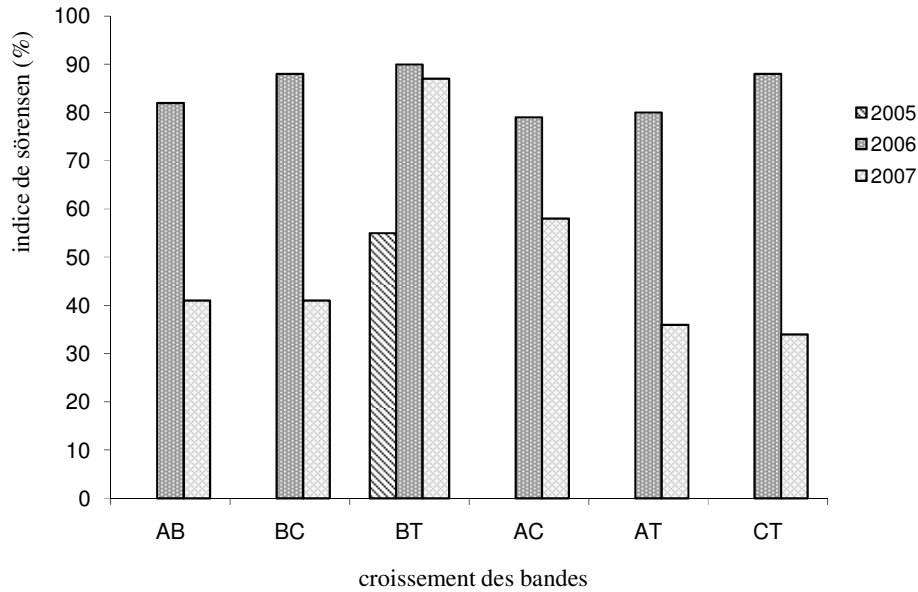


Figure 14: Evolution de la diversité bêta entre les bandes de 2005 à 2007

NB : Les diagrammes représentent la somme des espèces recensées dans les bandes au cours des cinq prélèvements (17 juillet, 24 juillet, 7 août, 17 août et 28 août) pour chacune des années.

Les couples de lettres représentent deux différentes bandes dont les listes floristiques sont comparées.

Durant l'année 2006, notre zone d'étude a enregistré 202 mm de pluies. Entre le début et la fin de la saison des pluies, correspondant à la période de relevés floristiques, 45 espèces d'herbacées, réparties entre 18 familles ont été recensées sur la dune, toutes bandes confondues. Le recensement floristique de cette année 2006 attribue respectivement 40, 10 et 10 % du nombre total des espèces recensées aux Poaceae, Cucurbitaceae et Convolvulaceae (voir annexe III. pour les détails sur les espèces). La famille des Poaceae domine en abondance de nombre d'espèces tout le long de la saison des pluies (Figure 15) (voir annexes II. pour les détails).

La croissance en nombre de la famille dominante, de 7 à 12 espèces, coïncide avec la progression de la saison pluvieuse. Les espèces des familles des Molluginaceae et des Acanthaceae ne sont apparues qu'au dernier relevé (fin de la saison pluvieuse). Celle des Tiliaceae n'est apparue qu'au troisième relevé et celles des Salpiniaceae et Polygalaceae, qui apparaissent au premier relevé, disparaissent pour ne réapparaître respectivement qu'aux quatrième et dernier relevés.

Chez les espèces secondaires, on n'observe pas une grande variation du nombre d'espèces entre le premier et le dernier relevé floristique.

Durant toute l'étude, les familles les plus abondantes en nombre d'espèces recensées au sein du dispositif étaient, dans l'ordre décroissant, les Poaceae, les Cucurbitaceae et les Convolvulaceae, indépendamment des bandes.

Les espèces dominantes dans toutes les bandes, en nombre d'individus, étaient *Cenchrus biflorus* Roxb. et *Aristida adscensionis* L., type biologique caractéristique de la zone sahélienne.

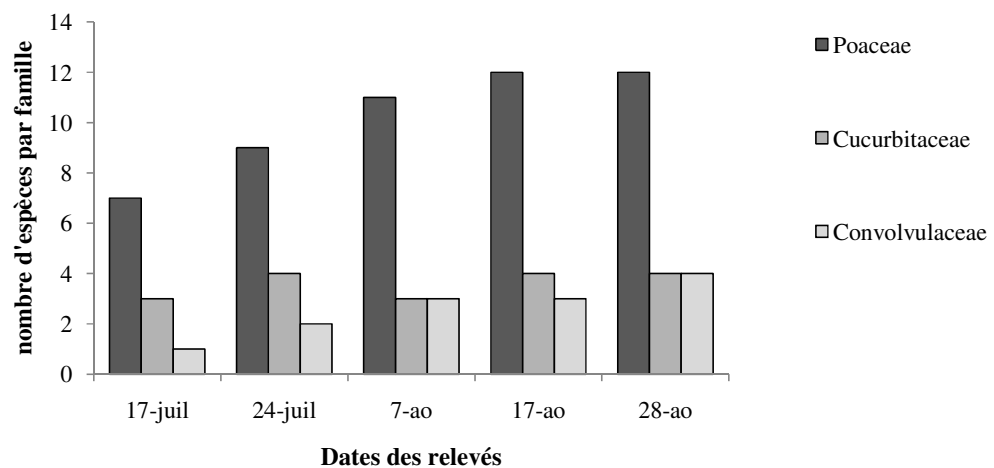


Figure 15: Evolution des familles dominantes le long de la saison pluvieuse 2006
(Voir annexe III. pour les détails sur la composition floristique)

Cependant, les espèces recensées sont inégalement réparties au sein du dispositif. Ainsi, on a observé une plus grande concentration, en nombre d'espèces, aux abords des palissades. De même, les biomasses produites, en augmentation au fil des ans, ne sont pas uniformément réparties sur la surface du dispositif comme en témoignent les travaux de Tidjani (2008). Ce dernier a observé, au sein du dispositif de fixation de dunes, une augmentation quantitative de végétation plus importante à proximité des palissades, environ 2 tonnes à l'hectare contre 1 au milieu des parcelles.

1.2. Discussion

Les principales caractéristiques (hauteur, porosité, longueur) du dispositif anti-érosif, installé sur la dune vive de Tchago, répondent aux normes d'efficacité de brise-vent retrouvées dans la littérature (Skidmore et Hagen, 1977 ; Roose, 1994 ; Michels *et al.*, 1998 ; et Vézina, 2001). La technique utilisée a donné des résultats prometteurs en matière de lutte

contre l'ensablement. En effet, le matériau utilisé (branchages de *Leptadenia pyrotechnica*) a présenté de bonnes capacités de fixation du sable et de lutte contre l'activité éolienne.

D'après les travaux de Tidjani (2008), en 2005, année de la mise en place des palissades, une réduction significative des flux a été observée au sein du clayonnage (– 95 % des flux enregistrés à 3 m au vent à l'extérieur de la première palissade à – 98,7 % respectivement à 2 et 16 m sous le vent à l'intérieur). En 2006, aucun flux de sable n'a été enregistré.

La réduction significative des flux de sable a permis une stabilisation du sol, marquée par une végétalisation rapide.

Les dépôts éoliens s'accompagnent d'un piégeage des semences de diverses espèces qui s'y installent grâce aux conditions favorables créées par les palissades. Pontanier *et al.* (2003), dans les conclusions de leurs travaux, confirment l'augmentation de la richesse floristique, malgré une faible pluviométrie, par une mise en défens assurée par la clôture d'une parcelle. Et, d'après Van Aarde *et al.* (1996), les brise-vent réduisent l'érosion, affaiblissent le vent et améliorent le microclimat pour une bonne germination des graines. Le développement végétal observé témoignerait ainsi d'un environnement plus favorable. Cette importante productivité observée dans les environs des palissades pourrait être expliquée, d'une part, par le piégeage beaucoup plus important de semences et, d'autre part, par une augmentation de la fertilité du sol. L'enrichissement du sol serait dû à une sédimentation des limons fins, et à la présence de matière organique, à la faveur de la décomposition de la végétation herbacée sèche de l'année précédente, mais aussi d'éléments nutritifs (N, P, K) contenus dans les flux de sable piégés par les palissades. En effet, Tidjani (2008) a observé, en une année, et suite aux dépôts de sédiments éoliens, un enrichissement de 4 % en N, 5 % en P, 4 % en K et 4 % en C dans les dix premiers centimètres du sol au niveau du clayonnage. Michels *et al.* (1998) avaient déjà fait des observations similaires au niveau des palissades d'un dispositif antiérosif.

Selon Tidjani (2008), en termes de biomasse végétale, la restauration écologique s'est faite en une seule année à proximité des palissades et de façon plus progressive au niveau des bandes. Ainsi, selon ses résultats, la biomasse végétale a évolué, entre 2005 et 2007, de 1,8 à 2 tonnes environ au niveau des palissades extérieures, de 0,2 à 0,8 tonne environ au milieu des parcelles et de 0,3 à 1 tonne environ au niveau de la palissade intérieure. L'apparition d'auréoles nues observées au milieu des claies serait due, pour une part, à l'encroûtement sous l'effet de la battance et, d'autre part, à un tassement d'herbes sèches de l'année précédente incomplètement décomposées, ce qui contribuerait à réduire le taux de germination des

annuelles (Pontanier *et al.*, 2003). Il en résulte une limitation de l'installation de nombreuses herbacées (Mahamane *et al.*, 2007).

L'établissement du tapis herbacé sur la dune contribue à l'augmentation de la rugosité du sol. L'important développement racinaire des herbacées permet l'agrégation des particules de sol. La couverture végétale lui assure une protection contre l'érosion éolienne. La stabilisation de ce milieu dunaire peut être aussi expliquée par la similarité dans l'enrichissement et la composition floristique, de la bande B (clayonnage) et de la bande témoin T moins dégradée et clayonnée.

Ceci permettrait d'avancer que les effets du dispositif auraient conféré au sol dunaire des caractéristiques agro-écologiques semblables à celles de la bande témoin T stable, utilisée comme bande de référence dans cette étude. La colonisation de la bande T de référence, par des nouvelles espèces d'herbacées, montre que l'absence de perturbation permet également au milieu écologique moins dégradé au départ d'évoluer positivement.

Ainsi, le dispositif anti-érosif contribue à l'amélioration des conditions agro-écologiques favorables à la germination et au développement des plantes ainsi qu'à la stabilisation et à la restructuration du sol dégradé, donc, *in fine*, à la restauration écologique du milieu.

Ces résultats sont confortés par les travaux de Li *et al.* (2006) en Chine. Sur base d'observations expérimentales de champ, ces auteurs ont montré que les effets des palissades (quadrillages) anti-érosives peuvent être récapitulés comme suit :

- augmentation de piégeage du dépôt de la poussière dans les systèmes dunaires ;
- développement de l'horizon de surface du sol dunaire et augmentation de l'accumulation du limon et de l'argile ;
- amélioration des conditions écologique du sol dunaire pour l'invasion et l'établissement de la végétation ;
- et amélioration de la teneur en éléments minéraux du sol et de la capacité de rétention en eau.

Li *et al.* (2006) concluent que ces résultats pourraient être interprétés comme une amélioration dans la formation des croûtes biologiques de sol, dans la réduction de l'érosion éolienne et dans le développement de conditions écologiques favorables de l'habitat pour la végétation.

Au-delà de nos résultats, nous avons observé l'installation de certaines espèces animales dans le clayonnage. Il s'agit des termites, des rongeurs, des reptiles, des scorpions et d'insectes.

Cependant, cette restauration écologique amorcée reste très instable. La pérennité des résultats obtenus reste très discutable. En effet, le couvert végétal appelé, plus tard, à se

substituer au clayonnage dans le rôle anti-érosif, demeure fragile malgré la productivité appréciable des herbacées. La majorité de celles-ci est constituée d'annuelles notamment les thérophytes (qui survivent à la sécheresse sous forme de graines) très sensibles aux déficits pluviométriques (Mahamane *et al.*, 2007). Bien que la flore d'annuelles se soit enrichie au fil des ans, l'analyse de la diversité montre que la mise en défens n'aboutit pas au remplacement des annuelles par des herbacées pérennes (Hiernaux, 1998) capables de survivre aux sécheresses très fréquentes dans cette zone.

De plus, la décomposition progressive des branchages de *Leptadenia pyrotechnica* provoque l'affaissement du clayonnage, ce qui annule les effets brise-vent de celui-ci. Dans ces conditions, l'ensablement pourrait reprendre son cours si, entre-temps, la dune « d'arrêt » créée au niveau des palissades n'est pas définitivement fixée, surtout durant l'Harmattan, d'autant plus que les herbacées sont sèches en cette période pendant laquelle, selon les travaux de Tidjani (2008), la fréquence des vents érosifs (au dessus de 6 m/s considéré comme seuil de saltation), est plus élevée.

1.3. Conclusion partielle

L'objectif recherché dans la fixation mécanique de dunes demeure la stabilisation du sol dunaire à travers l'arrêt ou la réduction de l'érosion éolienne dans le but de promouvoir une restauration écologique du milieu. L'installation du dispositif anti-érosif, le clayonnage, sur la dune vive de Tchago a enclenché des modifications agro-écologiques et climatiques importantes au niveau de ce milieu. Les résultats obtenus illustrent une stabilisation de la dune, à la faveur d'une réduction importante de l'activité éolienne. Cette stabilisation a permis le retour d'une végétation importante dans sa composition et son développement qui est favorisée par un piégeage en masse des semences avec une pluviométrie normale et un microclimat créé par les palissades entraînant un enrichissement progressif en éléments nutritifs. Tous ces facteurs ont aussi contribué à une amorce dans le rétablissement de la structure du sol.

Au vu des résultats obtenus dans cette étude, la technique de clayonnage utilisée dans le Département de Gouré pour la fixation mécanique des dunes de sable s'est avérée efficace. Cependant, la végétation, dans sa composition floristique est à dominance d'annuelles. Ces annuelles, sensibles à la sécheresse, sèchent durant l'Harmattan, ce qui ne garantit pas la pérennisation des résultats obtenus.

Quoique efficace, comme l'attestent les résultats obtenus dans cette étude, la fixation mécanique est limitée dans ses effets, par le caractère annuel de la végétation spontanée.

Selon Grouzis et Akpo (1998), dans les régions sahéliennes, la reconstitution des écosystèmes dégradés doit reposer sur l'association herbacées-ligneux afin de concilier la production herbacée et la stabilité du milieu, apportée par les ligneux en raison de leur moins grande sensibilité aux perturbations de l'environnement. Les observations de ces mêmes auteurs dans le Ferlo au Sénégal (280 mm de pluies/an) ont montré que l'arbre contribue à augmenter la richesse floristique de la strate herbacée et à accroître sa production.

Le recours aux ligneux, pour autant qu'ils soient bien adaptés aux conditions climatiques et écologiques locales, semble donc indispensable à la pérennisation de la fixation.

II. SELECTION D'ESPECES LIGNEUSES ADAPTEES A LA FIXATION DES DUNES DANS LA ZONE DE GOURE

2.1. Résultats

La Figure 16 présente les différents taux de survie enregistrés durant les trois premières années au niveau de la dune préfixée.

Dès la première année, on constate des différences entre les espèces. Les taux de survie les plus élevés ont été observés pour *Prosopis juliflora*, *Balanites aegyptiaca*, *P. chilensis* et *Acacia nilotica*. Ces espèces, qui paraissent être les plus performantes, présentent des taux de survie voisins de 70,0 %. Ce taux n'est plus que de l'ordre de 60,0 % chez *Acacia tortilis* et *A. senegal*.

Bauhinia rufescens et *Ziziphus mauritiana* sont les moins performants, avec respectivement 40 et 30 %, environ, de taux de survie la première année.

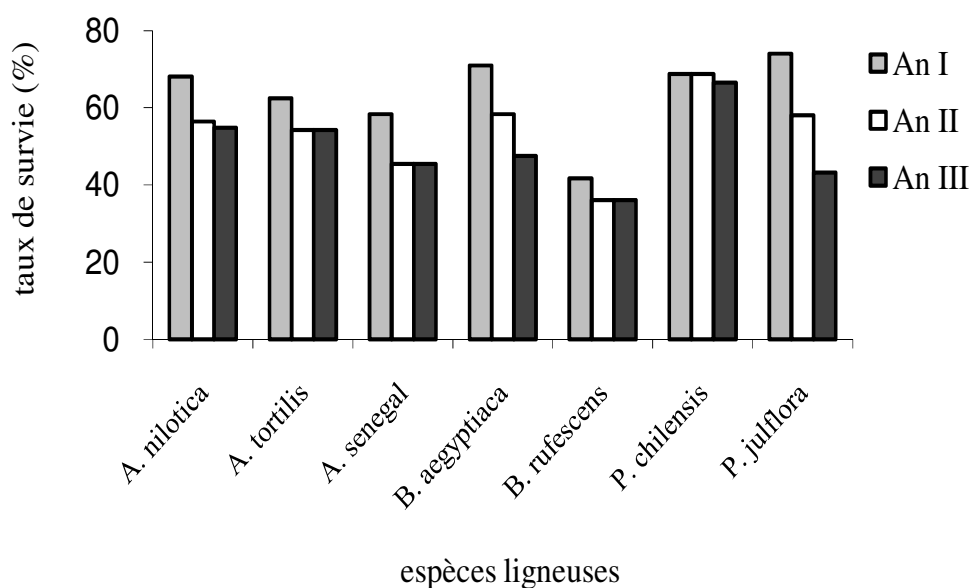


Figure 16: Variation de taux de survie sur le site transplanté de Tchago

Après trois ans, seule l'espèce *Prosopis chilensis* a pu maintenir un taux de survie comparable à celui de la première année (66,6 % contre 68,7 %).

En ce qui concerne les autres espèces, si *Acacia nilotica* et *A. tortilis* gardent des taux de survie supérieurs à 50,0 %, *Balanites aegyptiaca* et *A. senegal* ne sont plus qu'à 45,0 % et *P. juliflora* et *B. rufescens* tombent respectivement à 43,0 et 36,0 %.

Cependant, ces résultats masquent une variabilité dans l'évolution des taux de survie chez les espèces. En effet, certaines espèces, qui avaient montré une mortalité de plants élevée en première année, ont maintenu la même population les deux années suivantes. Il s'agit d'*Acacia tortilis*, *A. senegal* et *B. rufescens* et, dans une moindre mesure, d'*A. nilotica* et *P. chilensis*, qui ont perdu moins de 3 % de leur population entre la deuxième et la troisième année.

Par contre, *Balanites aegyptiaca* et *Prosopis juliflora* ont perdu encore entre 10 et 15 % de cette population.

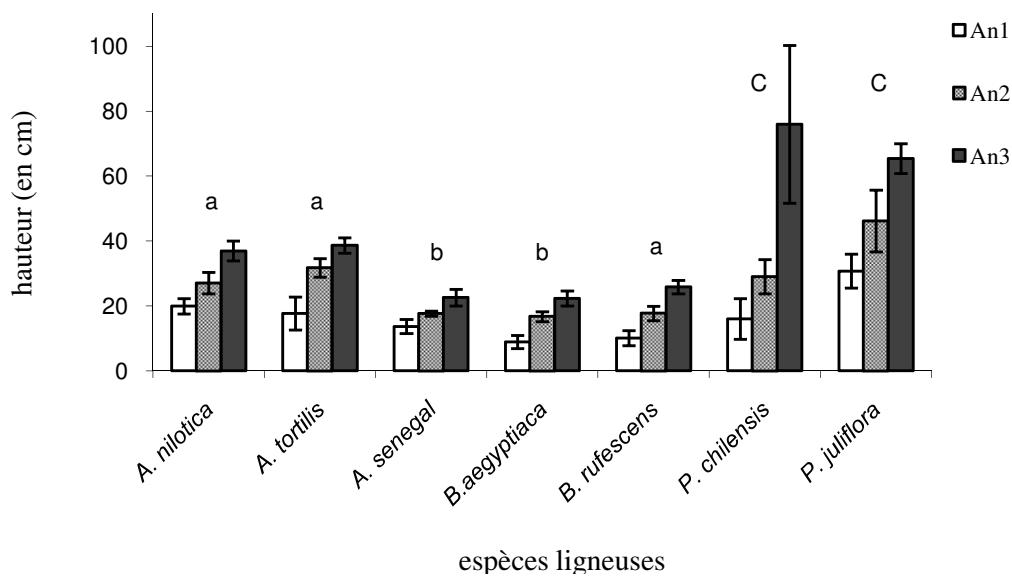


Figure 17: Evolution de la croissance annuelle en hauteur des espèces sur le site de Tchago
 NB : Les vitesses annuelles de croissance des espèces sont comparées. Les colonnes ayant la même lettre ne diffèrent pas significativement (LSD, test de Newman Keuls, $p < 5\%$). Les barres représentent les écart-types.

Sur le site de la transplantation, *Prosopis chilensis* et *P. juliflora* ont connu une croissance en hauteur beaucoup plus rapide que les espèces autochtones (Figure 17). En effet, de la première à la troisième année, leur croissance respective est de 60 et 35 cm en moyenne. Cette valeur tombe à 22 cm pour l'espèce indigène qui a la plus forte croissance (*A. tortilis*). *B. rufescens*, *B. aegyptiaca* et *A. senegal* ont eu la croissance la plus lente avec des moyennes respectives de 15, 1 et 8 cm seulement.

L'analyse de variance a montré des différences significatives entre les croissances annuelles de ces espèces ($F = 1,70$ et $p = 0,0200$). Le test de Newman-Keuls a permis de confirmer les résultats précédents en classant les vitesses de croissance annuelle des espèces en

trois groupes statistiquement homogènes. Le premier groupe comprend les deux espèces de *Prosopis* qui ont donné les plus fortes vitesses de croissance (avec respectivement 30,0 et 17,4 cm/an) et, ensuite viennent les espèces *A. tortilis*, *A. nilotica* et *B. rufescens* avec des croissances (avec respectivement 10,5 ; 8,5 et 7,9 cm/an) et enfin le troisième groupe renfermant les espèces présentant les plus faibles valeurs de croissance, *B. aegyptiaca* et *A. senegal* (avec respectivement 6,7 et 4,5 cm/an).

En termes de croissance en hauteur, les espèces exotiques testées sont donc plus performantes que les cinq espèces indigènes.

En pépinière, les mesures de taux d'hydratation des plants soumis au stress hydrique ont montré une grande variabilité (Figure 18, ci dessous).

L'analyse de variance a montré des différences hautement significatives entre les moyennes des différents taux d'hydratation ($F = 31,83$ et $p < 0,0001$). Le test de Newman Keuls a classé les espèces en trois groupes homogènes statistiquement différents. Seul présent dans le premier groupe, *Acacia senegal*, qui a connu la croissance en hauteur la plus faible, a significativement limité la perte d'eau par rapport aux autres espèces. *A. senegal* serait donc l'espèce la plus tolérante à la contrainte hydrique. Le deuxième groupe, englobant les espèces de sensibilité intermédiaire, comprend *Acacia tortilis*, *A. nilotica* et *P. chilensis*. Le troisième groupe comprend les espèces les plus sensibles ayant perdu le plus d'eau, *P. juliflora*, *B. rufescens* et *B. aegyptiaca*.

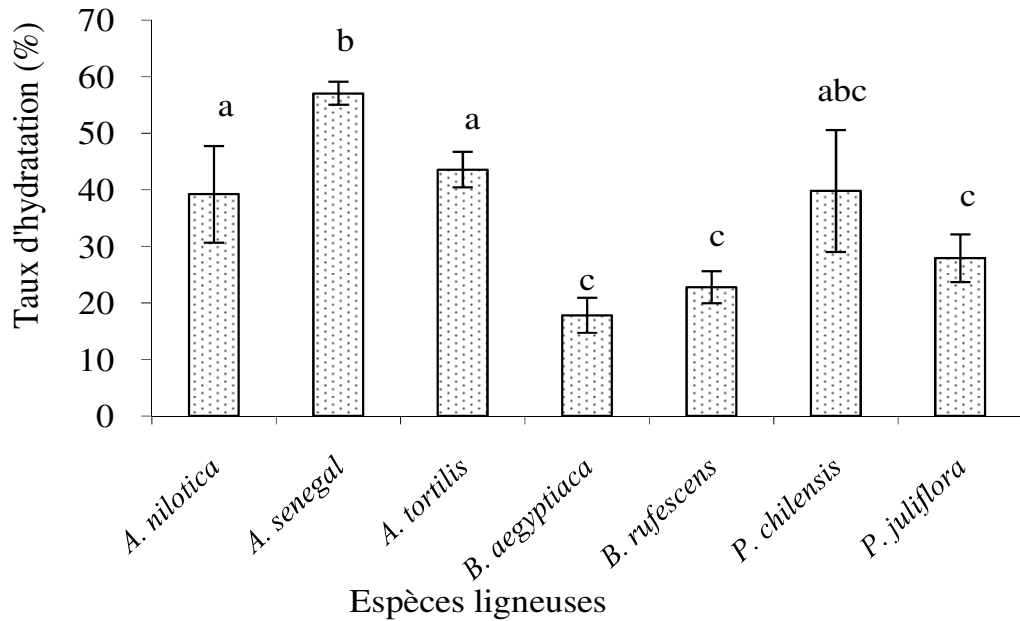


Figure 18: Taux d'hydratation des espèces après 6 jours de conduite à sec

NB : Les colonnes ayant la même lettre ne diffèrent pas significativement (LSD, test de Newman Keuls, $p < 5\%$). Les barres représentent les écart-types.

On peut donc classer les espèces comme suit : *A. senegal* > *A. tortilis* = *A. nilotica* = *Prosopis chilensis* > *P. juliflora* = *B. rufescens* = *B. aegyptiaca*.

2.2. Discussion

Les résultats relatifs aux taux de survie montrent qu'en général, après la mortalité observée durant la première année, et probablement due au choc de transplantation, les différents *Acacias* maintiennent leur population tout au long de l'expérimentation. Leur système racinaire pourrait expliquer cette adaptation. En effet, selon Vassal (2003), le système racinaire pivotant est souvent particulièrement développé en profondeur chez *Acacia*. Cet auteur rapporte aussi la mise au jour, lors des travaux du canal de Suez, de racines profondes atteignant une cinquantaine de mètres de longueur, pour une part attribuées aux *Acacias*. Le fort taux de survie des *Acacias* sur ce milieu aride serait favorisé par la perte saisonnière du feuillage et par la réduction de la conductance stomatique, qui contribuent à une diminution de l'intensité transpiratoire (Grouzis et Le Floc'h, 2003).

Les deux espèces de *Prosopis* ont également montré des taux de survie très appréciables, probablement à cause de leur installation rapide sur la dune, grâce notamment à leur système racinaire profond, mais aussi à leur capacité à pousser sur les sols sablonneux.

Cependant, bien que ces espèces introduites montrent la plus forte croissance dans notre étude, de nombreux auteurs ont rapporté une disparition subite des plants au delà de la quatrième année de transplantation. Ainsi, Gaye *et al.* (1998) rapportent, qu'au Sénégal, une étude a prouvé que les espèces d'*Acacias* australiens avaient un taux de survie supérieur à 80 %, une croissance plus rapide que la plupart des espèces locales, mais aussi un dépérissement à partir de la quatrième année ainsi qu'une perte d'aptitude à rejeter. Selon Pasiecznik *et al.* (2001), ces espèces peuvent survivre dans des régions avec des précipitations annuelles exceptionnellement faibles ou à de très longues périodes sèches, pour autant que les racines soient capables d'atteindre et de rester en contact avec l'eau de la nappe dès les premières années de plantation. Cependant, ces espèces ne favorisent pas l'expansion du couvert herbacé. En effet, selon FAO (1988), *Prosopis* rentrent en concurrence avec les herbacées par l'intermédiaire de la forte densité des racines superficielles qu'elles développent au collet, leur permettant d'explorer les horizons supérieurs du sol, limitant ainsi l'épanouissement des herbacées. Néanmoins, cela permet aux racines de retenir le sable (Munier et Rognon, 2000).

Bien que nous n'ayons pas des valeurs de référence pour chaque espèce, nos résultats indiquent que les deux espèces de *Prosopis* présentent des taux d'hydratation relativement plus faibles par rapport aux *Acacias*, en conditions de stress hydrique. Dans le cadre des opérations de fixation de dunes, il serait judicieux de planter ces espèces dans les premières lignes afin qu'elles protègent les autres espèces, considérées plus performantes en termes de résistance au stress hydrique et en durée de vie, de l'agression des vents et de l'abrasion des feuilles par le sable transporté. Cela permettrait ainsi une meilleure croissance et une colonisation durable de la dune.

Nos résultats montrent aussi les valeurs élevées du taux de survie et de la croissance de *A. tortilis* parmi les espèces d'*Acacias* étudiés. Ils sont en accord avec ceux de Gaye *et al.* (1998), qui rapportent que *A. tortilis* présente, par rapport à *A. seyal* et *A. senegal*, le meilleur taux de survie après la reprise, et la meilleure croissance dans des plantations réalisées au Sénégal. Nos résultats sont également en accord avec ceux de Grouzis (1984), qui rapporte qu'*A. tortilis* a eu le meilleur taux de survie (avoisinant les 50,0 %) dans une zone du Burkina Faso recevant 350 mm de pluies par an, parmi huit espèces indigènes dont d'autres *Acacia sp.*, *Balanites aegyptiaca*, *Ziziphus mauritiana* et trois espèces exotiques, et cela, quel que soit le type de sol.

L'espèce *A. tortilis* occupe aussi la deuxième place dans la limitation de la perte en eau en période de stress hydrique. Cette performance à s'adapter en milieu aride serait due à la longueur de ses racines et à la réduction de ses besoins en eau du fait de la faible surface foliaire (Prasad, 1991 ; Berger *et al.*, 1996 ; Diouf, 1996 ; Grouzis *et al.*, 1998). C'est une espèce particulièrement résistante à la sécheresse et adaptée à une large gamme de pluviosité.

Dans l'essai de stress hydrique (Figure 18), *Acacia senegal* présente la meilleure limitation en perte d'eau des tissus. C'est une espèce très résistante à la sécheresse, qui prospère sur les plaines sableuses sèches ou les dunes (Doran *et al.*, 1983). Les principaux problèmes auxquels est confrontée cette espèce demeurent sa sensibilité aux attaques parasitaires et aux maladies ainsi que sa croissance très lente (Colonna *et al.*, 1991). Ceci constitue souvent une entrave dans son utilisation pour la fixation de dunes, où une croissance rapide est souhaitée pour éviter l'ensevelissement des jeunes plants. Une biomasse importante est également désirée pour ralentir la force du vent.

Dans une moindre mesure que *Acacia tortilis* et *A. senegal*, *A. nilotica* présente une limitation appréciable de la perte d'eau des tissus en conditions de stress hydrique. Cette espèce présente un meilleur taux de survie et une croissance plus rapide que *A. senegal*, ce qui lui confère une place de choix dans la fixation de dunes, où ces atouts sont recherchés pour assurer un recouvrement effectif et rapide des surfaces. Ces résultats sont en accord avec ceux obtenus par Ndour et Danthu (1998), qui ont classé *A. tortilis* et *A. senegal* parmi les espèces les plus tolérantes à la contrainte hydrique et *A. nilotica* parmi les plus sensibles, dans un lot regroupant aussi *F. albida* (Del.) A. Chev., *A. dudgeoni* Craib ex Holland, *A. seyal* Delile, *A. sieberiana* DC. et *A. erhenbergiana* Hayne..

Par contre, les espèces *Balanites aegyptiaca* et *Bauhinia rufescens* présentent les résultats les moins performants en termes de résistance au stress hydrique et de croissance en hauteur.

Balanites aegyptiaca, malgré un taux de survie important (mais dégressif dans le temps) et son système racinaire latéral et pivotant, ne constitue pas une espèce fixatrice de dunes. En effet, son principal inconvénient est la lenteur de sa croissance au cours des premières années, qui constitue un sérieux handicap pour résister à l'ensevelissement. Selon M'Baré (2001), cette lenteur de croissance est probablement liée à son système racinaire traçant très insuffisant, qui ne lui permet pas de valoriser les faibles précipitations de moins de 30 mm qui, pourtant, caractérisent les zones arides au Sahel. De plus, l'effet de déflation, provoqué par une canopée trop dense sur un pied élevé, observé sous les arbres adultes de cette espèce, ne milite pas en faveur de son utilisation dans la fixation des dunes.

L'espèce *Bauhinia rufescens*, bien qu'elle supporte très bien les sols sableux et secs, est inadaptée dans la fixation de dunes, en raison de sa croissance lente et de son faible potentiel à limiter la perte d'eau des tissus en période sèche.

2.3. Conclusion partielle

Les différents résultats ont montré que : (i) les espèces exotiques testées (*Prosopis sp.*) sont plus performantes en termes de croissance, (ii) les espèces d'*Acacia* sont plus résistantes au stress hydrique et, (iii) ces deux groupes se valent sensiblement en taux survie après trois ans avec un léger avantage pour *P. chilensis*. Tous ces paramètres contribuent, en général, à la réussite d'une fixation biologique de dunes.

L'inconvénient majeur du *Prosopis* pour son utilisation à long terme est le peu de longévité des espèces exotiques, mais aussi la limitation de l'épanouissement des herbacées. Ajoutons, à ceci, le rejet de l'espèce *P. juliflora* par les populations locales qui, selon elles, serait responsable de la baisse de niveau de la nappe phréatique.

Celui de *Acacia* est sa croissance lente, malgré ses multiples usages par les populations.

En croisant les différents résultats de cette étude (taux de survie, croissance en hauteur et limitation des pertes d'eau), il apparaît qu'une combinaison de *Prosopis* (croissance initiale rapide) et d'*Acacia* (meilleure longévité et usages plus intéressants) permettrait de combiner à la fois l'efficacité de la fixation des dunes à court terme et l'intérêt socio-économique ultérieur de la plantation.

Bien que, au terme de cette étude, la croissance encore limitée des espèces expérimentées n'ait pas permis de quantifier l'efficacité de cette fixation biologique, les résultats obtenus témoignent de l'adaptation de certaines espèces au milieu dunaire.

Cependant, malgré ces résultats prometteurs, il n'en demeure pas moins que la croissance et le développement de ces espèces soient ralentis par les conditions écologiques défavorables de ce milieu. En effet, le déficit hydrique et minéral, l'instabilité du sol ou encore les micro-organismes pathogènes qu'il abrite, limitent leurs performances à coloniser la dune.

Pour que la fixation biologique soit effectivement plus efficace et plus efficiente, la plantation devrait enregistrer des taux de survie élevés, une croissance accélérée des plants sains et résistants au stress hydrique et une amélioration de la disponibilité d'éléments nutritifs. Or, il est prouvé que, dans la nature, l'association des racines avec des micro-organismes, les champignons mycorhiziens arbusculaires (CMA) permettent à la plante de surmonter les insuffisances nutritives, de réduire la mortalité due au choc de transplantation et

de stimuler la croissance tout en lui conférant une résistance aux attaques parasitaires (Strullu, 1991 ; Diop, 1996).

Selon ces auteurs, les mycorhizes amélioreraient, ainsi, les chances de l'établissement de la plantation et de la restauration des sols dégradés et, au-delà, celles de la fixation biologique.

Cependant, ces micro-organismes ne sont pas toujours présents sur tous les types de sol pour que toutes les plantes en bénéficient (Khan, 1974). Selon Redell et Warren (1986), les CMA indigènes sont inexistantes ou très faibles sur les sols dégradés et érodés. Mais aussi, il est admis que l'optimum de développement des CMA se situe dans les sols déficients en phosphore, azote et potassium (Diop *et al.*, 1998), conditions caractéristiques des régions sahéliennes. Il faut aussi mentionner qu'il y a très peu d'études publiées sur la diversité des populations de Glomales au Niger, et aucune sur le Sud-Est du pays. C'est pourquoi, l'évaluation de la disponibilité et de la biodiversité locales de ces CMA s'imposait comme étape suivante de notre étude.

III. DIVERSITE DE GLOMALES DES SOLS DE GOURE ET PRODUCTION D'INOCULUM

3.1. Résultats

Les observations des racines contenues dans les échantillons récoltés sur le terrain indiquent, qu'à l'exception de *M. crassifolia*, toutes les espèces sont naturellement endomycorhizées (Figure 19). Cependant, l'analyse de variance montre que les taux moyens de mycorhization de racines sont significativement différents selon les espèces ligneuses ($F=29,25$ et $p = 0,0001$). Selon les résultats du test de Newman-Keuls *A. nilotica*, *Z. mauritiana* et *P. chilensis*, ont des taux de mycorhization statistiquement comparables. Les plus forts taux de colonisation racinaire ont été observés chez *A. nilotica* (40,0 %), *Z. mauritiana* (37,0 %) et *P. chilensis* (35,3 %). Le second groupe statistiquement homogène regroupe les espèces *P. juliflora* (20,3 %), *A. senegal* (20,3 %) et *A. tortilis* (15,6 %). Les espèces à très faible taux de mycorhization regroupent *L. pyrotechnica* et *B. aegyptiaca*, avec seulement 3,0 % et 5,0 %, respectivement.

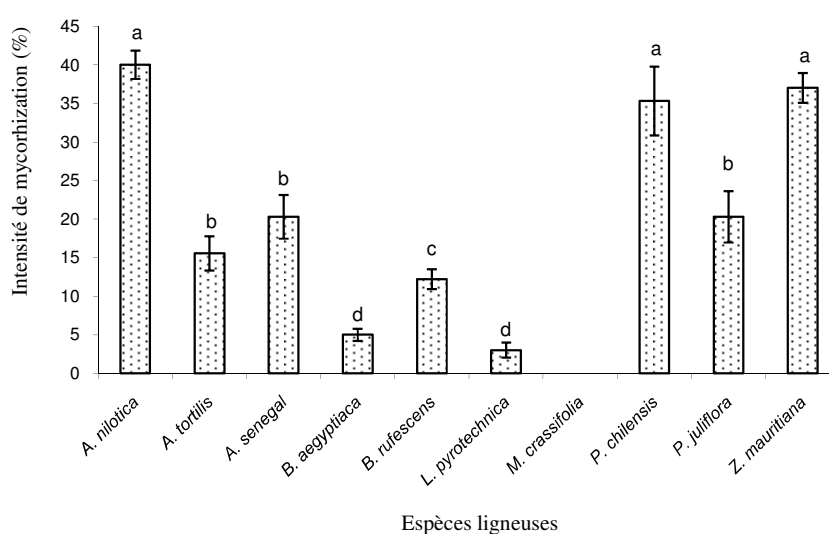


Figure 19: Intensité de mycorhization naturelle des espèces adultes

NB : Les colonnes ayant la même lettre ne diffèrent pas significativement (LSD, test de Newman Keuls, $p < 5\%$). Les barres représentent les écart-types.

Les observations de la description des Glomales natives isolées montrent la présence de quatre types de spore dans les échantillons de sols prélevés (Photo 12). Le premier type est

de la famille des Glomaceae et du genre *Glomus*, le deuxième et troisième types appartiennent à la famille des Gigasporaceae et le quatrième type est non identifié.

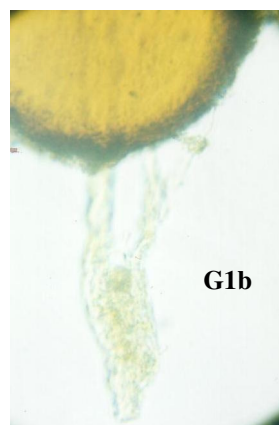
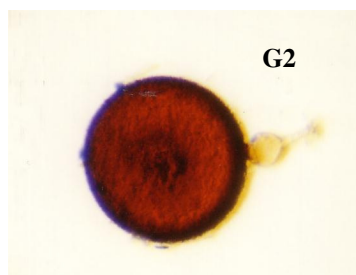
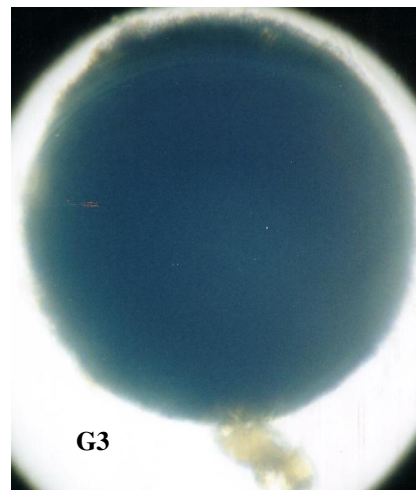
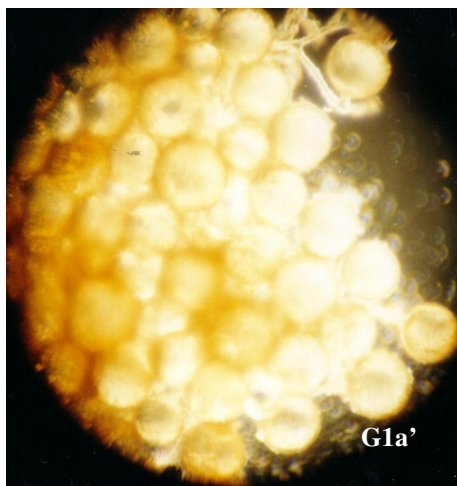


Photo 12 : Les différents types de spores identifiées (Grossissement x 400)

La description des Glomales, selon la combinaison des clés décrites par Schenck et Pérez (1987) et Omar *et al.*, (1979), donne les descriptions suivantes pour les types de spores observées dans les échantillons de sols :

- Type G1 : Les spores de ce groupe sont de forme sphérique à ellipsoïdale avec un hyphe de suspension cylindrique. Ce type de Glomales comporte des spores de couleur blanche (photo G1a) ou jaune (photo G1b). Elles se présentent le plus souvent en amas de trois à quatre, voire des centaines de spores (photos G1a' et G1b') et ont un diamètre qui varie de 60 à 180 μm .

- Type G2 : Les spores formant ce groupe sont de forme sphérique, de diamètre plus grand que celui les spores de type G1 variant entre 200 et 360 μm et sont de couleur ocre, en général. Elles se présentent toujours en solitaires et portent des hyphes suspenseurs bulbeux (photo G2).

- Type G3 : Les spores de type G3, de forme sphérique, se présentent aussi toujours en solitaires et sont de couleur noire et quelquefois brun-foncé. Elles portent aussi des hyphes à suspension bulbeuse (photo G3) et ont un diamètre variant entre 240 à 360 μm .

Les principales caractéristiques identifiées chez les spores de type G1 sont attribuables à la famille des Glomaceae et au genre *Glomus*. Celles observées chez les spores de type G2 et type G3 appartiennent à la famille des Gigasporaceae.

Tous ces types de spores sont présents dans chacun des échantillons observés. Cependant, le nombre de spores varie selon les espèces sous lesquelles le prélèvement d'échantillon de sol a été effectué. Ainsi, dans 100 g de sol, une moyenne de 62 spores a été observée sous *P. juliflora*, 41 sous *A. nilotica* contre 24 sous *B. rufescens* avec 6 répétitions. Avec une moyenne de 56,1 % de spores totales, *Glomus sp.* apparaît être le genre de Glomales le plus abondant dans les sols de Gouré (Figure 20 ci dessous).

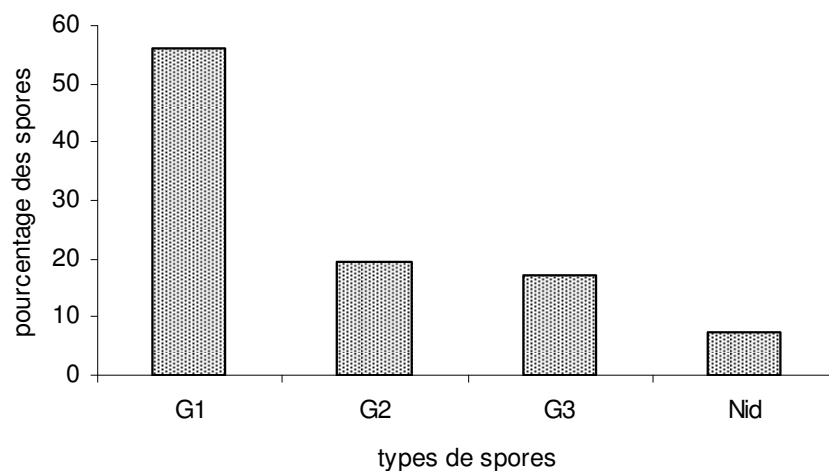


Figure 20 : Taux de viabilité des différents types de spores de Glomales

La viabilité des spores, selon la méthode de coloration vitale au MTT sigma (An et Hendrix, 1988), est plus importante chez le genre *Glomus sp.* (G1), avec une moyenne de 23,3 % contre 8 % pour le type G2, 7,2 % pour type G3 et 3 % pour les spores de type non identifié, pour un total de 42,0 % de spores vivantes.

Les observations de racines des cultures utilisées comme plantes-pièges inoculées montrent que toutes les espèces sont endomycorhizées. Les témoins étaient exempts de toute contamination mycorhizienne.

L'analyse de variance a révélé une différence très hautement significative entre les traitements ($F = 4,72$ et $p < 0,0010$) (Figure 21 ci-dessous) mais non significative entre types de plantes-pièges ($F = 0,56$ et $p = 0,6100$) et au niveau de l'interaction ($F = 1,11$ et $p = 0,3600$).

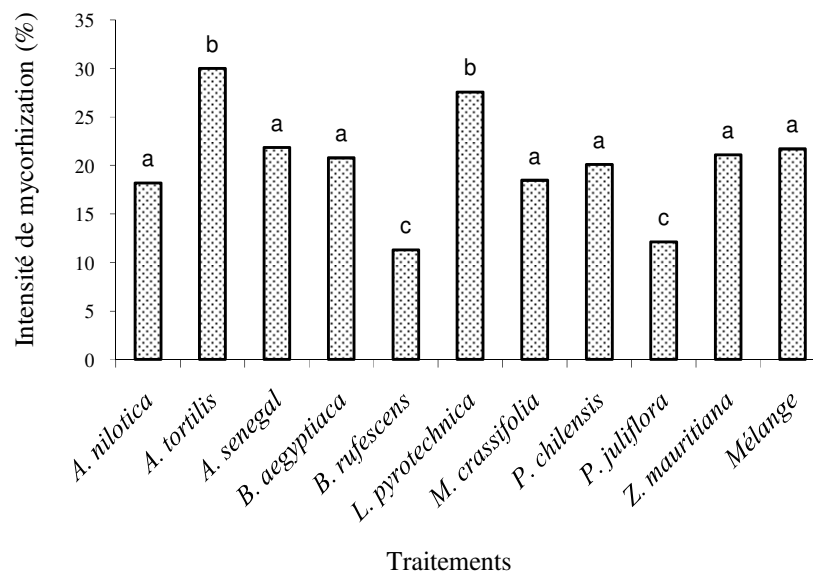


Figure 21: Moyennes de l'intensité de mycorhization des cultures pièges selon les différents traitements

NB : Les colonnes ayant la même lettre ne diffèrent pas significativement (LSD, test de Newman Keuls, $p < 5\%$).

Le test de Newman Keuls a classé les traitements en trois groupes homogènes statistiquement différents. Dans chacun des 3 groupes, l'intensité de mycorhization est comparable entre les espèces. Les sols prélevés au pied d'*A. tortilis* et de *L. pyrotechnica* ont des taux de mycorhization supérieurs (Figure 21). Les plus faibles taux de mycorhization ont été observés pour des sols prélevés sous *B. rufescens* et *P. juliflora*. Les sols sous *A. nilotica*,

A. senegal, *P. chilensis*, *B. aegyptiaca*, *Z. mauritiana*, *M. crassifolia* présentent des taux de mycorhization intermédiaires.

Quant aux spores, seuls les types observés dans les échantillons de sols prélevés à Gouré sont retrouvés dans l'inoculum produit, avec une prédominance de spores de *Glomus sp.*. La production des spores varie selon les plantes-pièges. Ainsi, dans 100 ml d'inoculum produit, on a des moyennes de 156, 109 et 107 spores respectivement pour le mil, le niébé et le sorgho. La quantité de spores produites avec le traitement constitué du mélange de 10 traitements ne diffère significativement ($F = 1,41$ et $p = 0,1900$).

L'inoculum produit a significativement stimulé la croissance des parties aériennes du sorgho ($t = 8,95$ et $p < 0,0001$) et du niébé ($t = 4,19$ et $p = 0,0140$) mais sans un effet significatif sur le mil ($t = 1,36$ et $p = 0,2260$) (Figure 22).

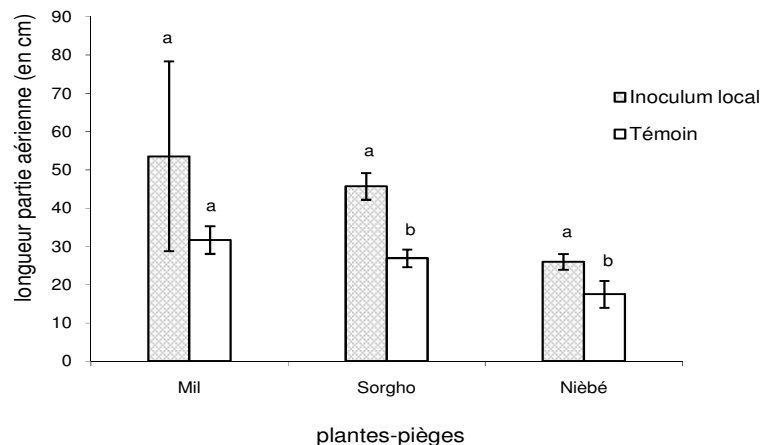


Figure 22: Effets de la mycorhization sur la croissance en longueur des plantes-pièges.

NB : Les comparaisons ont été effectuées au sein de chaque plante-piège : groupe traité vs groupe témoin. Ainsi, pour une plante-piège donnée, les histogrammes portant des différentes lettres indiquent une différence significative révélée par le test t. Les barres représentent les écart-types.

L'inoculum indigène produit était constituée d'un mélange du sol, de vermiculite et des propagules (fragments de racines et spores). Ses caractéristiques sont les suivantes, pour 100 ml :

- 360 fragments racinaires ;
- 69 vésicules par fragment d'un cm environ ;
- 1,15 cm de longueur moyenne par fragment racinaire ;
- 0,5 mg de poids moyen de fragment racinaire ;

- 142 spores en moyenne.

3.2. Discussion

Nos résultats révèlent que toutes les espèces ligneuses étudiées, excepté *M. crassifolia*, s'associent naturellement avec des CMA pour former des endomycorhizes.

Cependant, l'intensité de mycorhization varie selon les espèces. Selon Strullu (1991) et Diaga *et al.* (2003), il y a une compatibilité fonctionnelle entre les espèces végétales et les CMA, ce qui détermine une association préférentielle entre les symbiotes. Les différents taux d'intensité de mycorhization apparaissent relativement faibles mais appartiennent aux mêmes classes de mycorhization que celles observées par Dahiratou (1994) sur une quarantaine d'espèces sahéliennes étudiées à l'Ouest du Niger (Karma et N'Dounga).

L'absence ou le faible taux de mycorhization observé chez *M. crassifolia* et *L. pyrotechnica* pourrait être dû à leur système racinaire très pivotant.

Les observations des spores contenues dans les échantillons de sols montrent que les sols de Gouré contiennent des Glomales. Selon la clé de description de Schenck et Pérez (1987), quatre types de spores ont été décelés. Trois types ont été identifiés, dont le premier appartiendrait à la famille des Glomaceae et au genre *Glomus sp.* et les deux autres à la famille des Gigasporaceae. Ces résultats sont confortés par les travaux de Dahiratou (1994) qui avait, également, mis en évidence la présence des spores appartenant à la famille des Gigasporaceae et au genre *Glomus* dans des sols de l'Ouest du Niger.

Nos résultats montrent aussi que le nombre des spores des échantillons varie selon les espèces ligneuses, avec une prédominance du genre *Glomus sp.*, qui présente également une plus grande viabilité. Selon Diem *et al.* (1981), les facteurs environnementaux influencent la distribution taxonomique des CMA en région sahélienne. La dominance numérique des spores appartenant au genre *Glomus* a été aussi mise en évidence dans d'autres pays en Afrique, notamment dans les zones semi-arides du Sénégal (Diallo *et al.*, 1999) et au Burkina Faso (Guissou, 2001), dans la forêt tropicale humide du Cameroun (Musoko *et al.*, 1994), ou encore en Afrique du Sud (Gaur *et al.*, 1999). Bien qu'il y ait très peu d'études sur la diversité des populations de Glomales en Afrique, notamment en Afrique de l'Ouest (Guissou, 2001), ces observations attribuent une plus grande adaptabilité du genre *Glomus* aux sols africains.

Les résultats des taux moyens de mycorhization des plantes-pièges cultivées, montrent que les sols prélevés sous les espèces ligneuses non-mycorhizées (*M. crassifolia*) ou faiblement mycorhizées (*L. pyrotechnica* et *B. aegyptiaca*) sont aussi infectieux. En effet, l'inoculation avec ces différents sols a eu un effet significatif sur le taux de mycorhization des

plantes-pièges avec des taux d'intensité de mycorhization appréciables pour les échantillons respectivement récoltés sous *M. crassifolia*, *L. pyrotechnica* et *B. aegyptiaca*. Ces résultats sont aussi attribuables à la compatibilité fonctionnelle entre les espèces végétales et les CMA, rapportée par Strullu (1991) et Diaga (2003).

Les trois plantes-pièges utilisées semblent relativement d'une même efficacité dans le piégeage des spores. Les quantités de spores, statistiquement homogènes, produites par les différents traitements (le mélange de 10 traitements et chacun de ces traitements) montrent l'homogénéité des sols dans la composition et la distribution des CMA.

L'inoculum produit a été efficace sur la croissance de la partie aérienne du sorgho et du niébé et sans effet sur le mil. Les travaux de Plenchette *et al.* (2000) ont aussi abouti à des résultats similaires sur le mil inoculé au *Glomus aggregatum*. Ils ont observé que la mycorhization n'a pas stimulé la croissance du mil. Dans leurs travaux, Subba *et al.* (1985) expliquent que le mil est considéré comme ayant une faible dépendance mycorhizienne, bien que des stimulations de croissance aient pu être obtenues. Celles-ci fluctuent aussi en fonction des génotypes du mil (Krishna *et al.*, 1985) et de la souche mycorhizienne utilisée (Krishna et Dart, 1984). Selon Diagne et Ingleby (2003), le bénéfice procuré aux plantes infectées par les CMA dépend de la plante hôte et du milieu.

3.3. Conclusion partielle

La présente étude a mis en évidence la diversité des types de spores dans les sols de Gouré, où trois des quatre types de spores ont été identifiés comme appartenant aux familles des Gigasporaceae et des Glomaceae (genre *Glomus*). Ces familles ne sont pas spécifiques à un hôte végétal, mais sont réparties dans tous les sols de cette région.

Le genre *Glomus*, qui constituerait la principale composante de la flore endomycorhizienne de cette zone, a été répertorié dans plusieurs régions d'Afrique où il prédomine au sein des Glomales.

La variabilité de la diversité des Glomales associées aux dix espèces ligneuses reste faible. Cependant, la prudence doit être de mise, car l'identification de spores par des critères uniquement morphologiques n'est pas aussi formelle et catégorique.

Le piégeage, effectué à partir de 10 échantillons de sols, associés à des ligneux, a montré que toutes les zones de prélèvements contenaient des CMA capables d'infecter des racines des plantes-pièges. L'inoculum produit à partir de ces sols, a donné des résultats prometteurs dans la stimulation de la croissance de la partie aérienne du sorgho et du niébé, mais sans effet sur le mil. Une culture monospécifique des spores s'impose alors pour

déterminer la famille ou le genre des espèces de CMA dont l'inoculation serait la plus efficace dans l'amélioration de la croissance des végétaux.

Nos résultats ont montré que les CMA isolés sont efficaces dans l'infection et la stimulation de la croissance des plantes-pièges.

Dans la zone de Gouré, les espèces utilisées dans la fixation de dunes ont une croissance lente et les sols sont, très souvent, carencés en phosphore biodisponible.

Plusieurs auteurs (Cornet et Diem, 1982 ; Strullu, 1991 ; Diop, 1996 ; Duponnois *et al.*, 2007) ont démontré que la mycorhization améliore le taux de survie des plants lors de la transplantation de ligneux et la restauration des sols dégradés. Selon Garbaye (1991), la présence ou l'absence des champignons compatibles avec l'essence cultivée dans un système de reboisement est naturellement le facteur le plus important à prendre en considération pour juger de l'opportunité d'une intervention au niveau de la mycorhization.

Les résultats prometteurs, obtenus avec les plantes-pièges, suggèrent la possibilité d'expérimenter l'inoculation d'arbres avec des CMA dans les opérations de reboisement, pour stimuler la croissance juvénile, dans le but d'améliorer les conditions de reprise lors de la plantation. C'est ce que nous avons tenté dans un essai au champ, destiné à comparer les effets de l'inoculum indigène produit à ceux d'un inoculum témoin performant.

IV. POTENTIALITES DE L'INOCULATION MYCORHIZIENNE DES ESPECES FIXATRICES DE DUNES DANS LA ZONE DE GOURE

4.1. Résultats

- Expérimentation en pépinière

Les analyses de variance (ANOVA, test de Newman Keuls) des taux de mycorhization des espèces montrent que l'apport de *Glomus intraradices* a induit une colonisation racinaire significativement plus élevée que celles des autres traitements seulement chez *Acacia senegal* ($F = 3,53$ et $p = 0,07$). Chez les autres espèces, les taux de mycorhization induits par les différents traitements appartiennent au même groupe homogène ($p > 0,05$) (Figure 23).

Les résultats montrent que les racines des cinq espèces étudiées sont endomycorhizées. L'endomycorhization naturelle et provoquée est effective. Cette observation dénote du caractère endomycorhizien des CMA apportés par les différents traitements, signifié par l'absence de spécificité du symbiote fongique vis-à-vis de la plante-hôte.

Cependant, ces taux de mycorhization des espèces en pépinière diffèrent de ceux des arbres adultes (Figure 19).

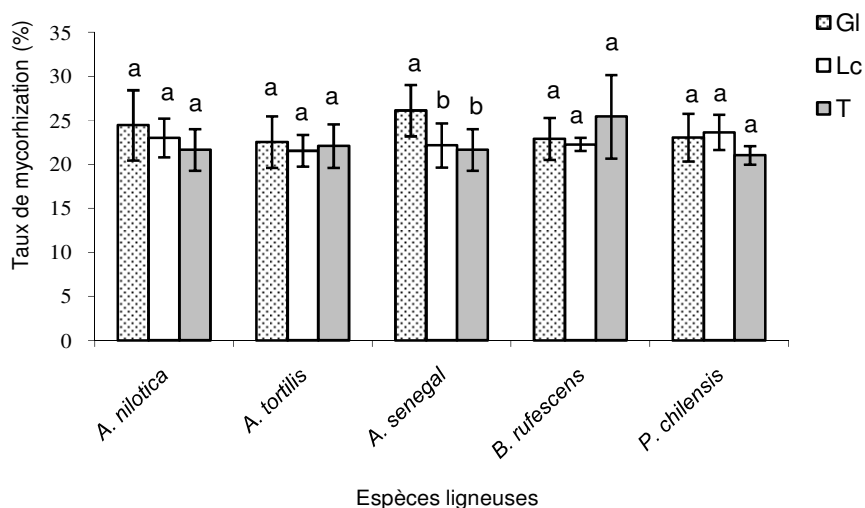


Figure 23: Intensité de mycorhization chez les espèces ligneuses selon les traitements

NB : Pour chaque espèce, les colonnes ayant la même lettre ne diffèrent pas significativement (LSD, test de Newman Keuls, $p < 5\%$). Les barres représentent les écart-types. GI, Lc et T représentent respectivement les espèces inoculées avec *Glomus intraradices*, l'inoculum local et les témoins non inoculés.

Dans la production de biomasse totale, le traitement avec apport de *G. intraradices* a eu des effets significativement positifs (ANOVA, $p < 5\%$) chez toutes les espèces ligneuses, à l'exception de *B. rufescens*, par rapport à l'inoculum naturel ($F = 1,32$ et $p = 0,30$).

Le traitement avec apport de l'inoculum de souches indigènes n'a induit une production de la biomasse totale significativement plus importante, par rapport au le traitement inoculum naturel, que chez deux espèces d'*Acacia* ; *A. nilotica* ($F = 12,6$ et $p = 0,0011$) et *A. senegal* ($F = 7,69$ et $p = 0,0071$) (Figure 24).

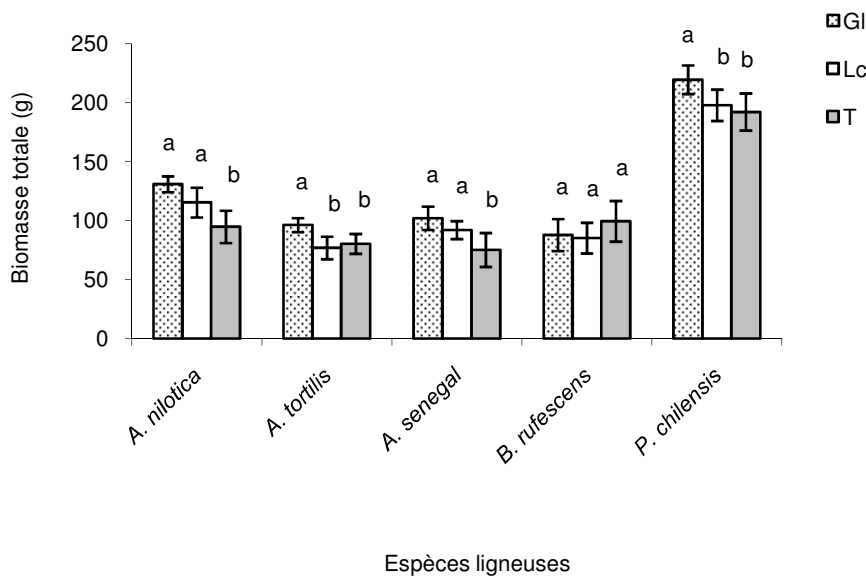


Figure 24: Effets de la mycorhization sur la production de la biomasse totale des espèces

NB : Pour chaque espèce, les colonnes ayant la même lettre ne diffèrent pas significativement (LSD, test de Newman Keuls, $p < 5\%$). Les barres représentent les écart-types. Gl, Lc et T représentent respectivement les espèces inoculées avec *Glomus intraradices*, l'inoculum local et les témoins non inoculés.

En ce qui concerne la croissance en hauteur des espèces en pépinière, le traitement avec apport de *G. intraradices* n'a eu d'effets significatifs par rapport l'inoculum naturel (ANOVA, test de Newman Keuls), que chez l'espèce *A. nilotica* ($F = 14,92$ et $p = 0,0001$), tandis que le complexe mycorhizien de souches indigènes a amélioré significativement la hauteur des plants d'*A. nilotica* ($F = 14,92$ et $p = 0,0001$) et *P. chilensis* ($F = 6,89$ et $p = 0,006$) (Figure 25).

Par contre, on note une dépression de la croissance en hauteur, suite aux apports mycorhiziens, et par rapport au traitement sans inoculation, chez les plants de certaines espèces ; c'est le cas pour le traitement avec apport de *G. intraradices* chez *A. tortilis*

($F = 13,70$ et $p = 0,0002$) et *A. senegal* ($F = 4,07$ et $p = 0,034$) et pour le traitement avec apport du complexe mycorhizien de souches indigènes chez *A. tortilis* ($F = 13,70$ et $p = 0,0002$).

Les apports mycorhiziens sont restés sans effet significatif chez l'espèce *B. rufescens* ($F = 1,12$ et $p = 0,35$).

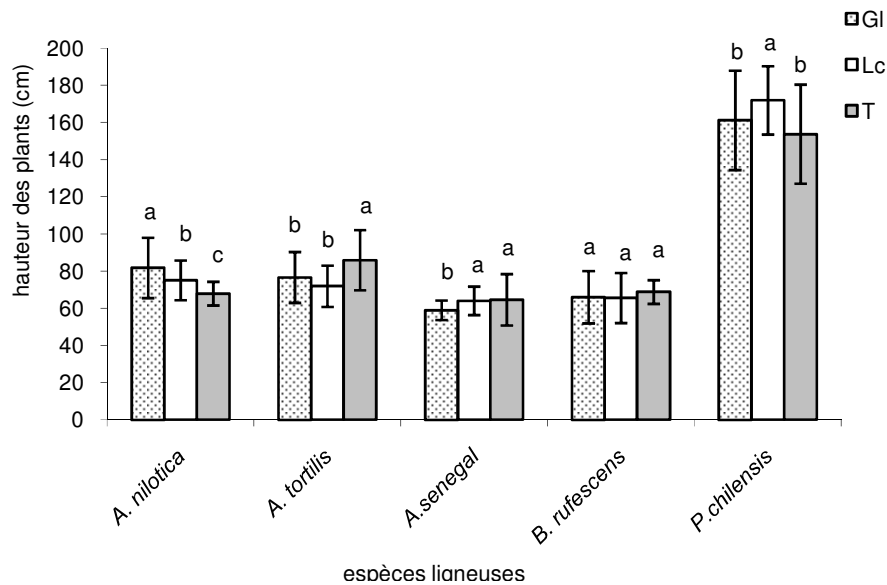


Figure 25: Croissance en hauteur des espèces en pépinière selon les traitements

NB : Pour chaque espèce, les colonnes ayant la même lettre ne diffèrent pas significativement (LSD, test de Newman Keuls, $p < 5\%$). Les barres représentent les écart-types. GI, Lc et T représentent respectivement les espèces inoculées avec *Glomus intraradices*, l'inoculum local et les témoins non inoculés.

Après 6 jours de stress hydrique, les taux d'hydratation obtenus ont montré qu'aucun des deux traitements avec apport mycorhizien n'a significativement (ANOVA, $p < 5\%$) limité la perte d'eau des plants par transpiration, par rapport au traitement 'inoculum naturel' (Figure 26). Les espèces *A. nilotica*, *A. tortilis*, *A. senegal*, *B. rufescens* et *P. chilensis*, avec 5 répétitions, ont eu respectivement comme valeurs statistiques de F et p, 0,57 et 0,58 ; 0,63 et 0,55 ; 0,50 et 0,62 ; 2,23 et 0,15 ; 1,95 et 0,18.

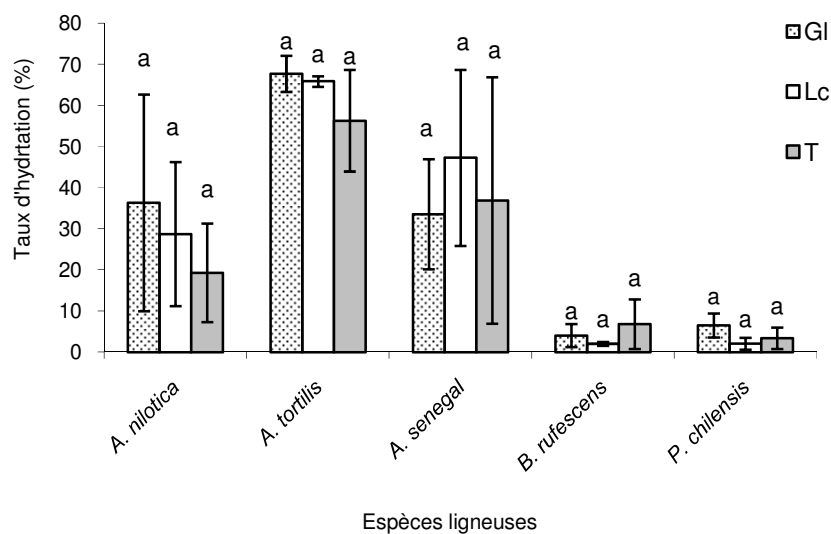


Figure 26 : Taux d'hydratation des espèces après six jours de stress hydrique

NB : Pour chaque espèce, les colonnes ayant la même lettre ne diffèrent pas significativement (LSD, test de Newman Keuls, $p < 5\%$). Les barres représentent les écart-types. Gl, Lc et T représentent respectivement les espèces inoculées avec *Glomus intraradices*, l'inoculum local et les témoins non inoculés.

- **Expérimentation sur la dune**

Trois années après la transplantation des plants sur la dune, les différents résultats de taux de survie enregistrés (Figure 27) montrent que, de manière générale, les apports mycorhiziens n'ont pas limité la mortalité des espèces par rapport aux plants non inoculés.

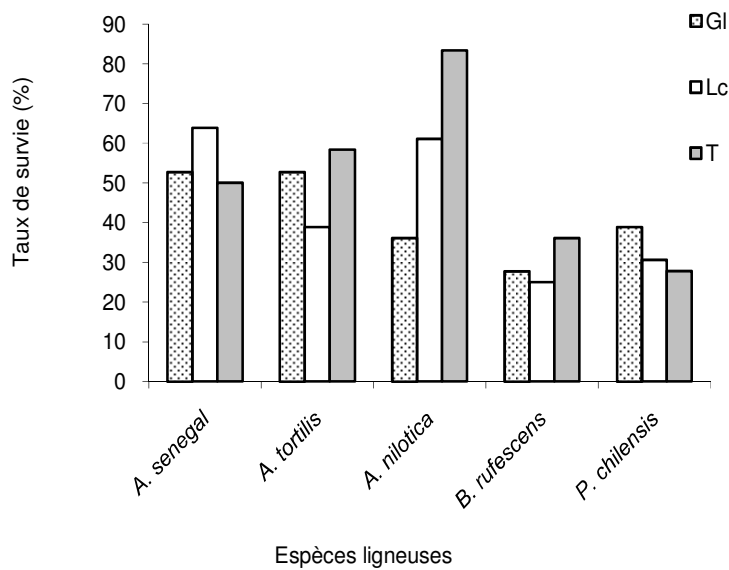


Figure 27 : Taux de survie des espèces transplantées sur la dune (3 ans après plantation)

NB : G1, Lc et T représentent respectivement les espèces inoculées avec *Glomus intraradices*, l'inoculum local et les témoins non inoculés.

Par contre, chez les espèces *A. nilotica*, *B. rufescens* et *A. tortilis*, on observe une mortalité des plants inoculés plus élevée que les non-inoculés, et cela, quel que soit l'inoculum.

Les résultats de l'analyse de variance au seuil de probabilité de 5 %, relatifs à la croissance en hauteur des espèces au champ, montrent que les apports mycorhiziens n'ont pas eu d'effets significatifs, par rapport au traitement inoculum naturel (Figure 28).

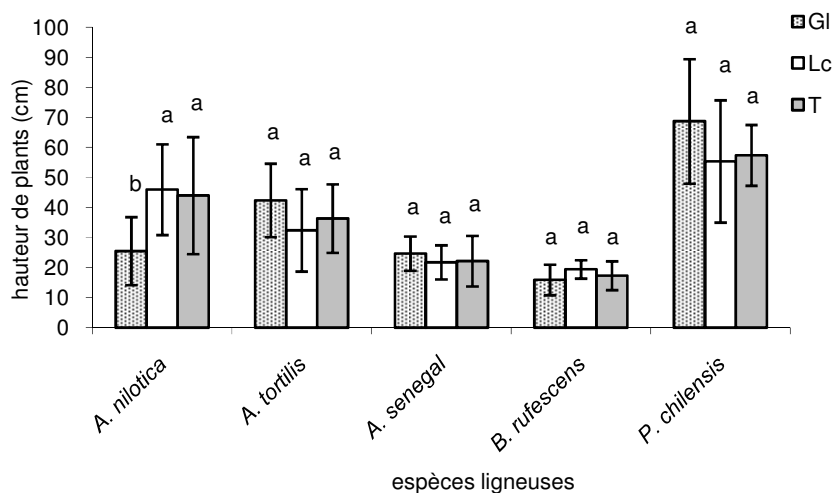


Figure 28 : Croissance en hauteur des espèces sur le site selon les traitements

NB : Pour chaque espèce, les colonnes ayant la même lettre ne diffèrent pas significativement (LSD, test de Newman Keuls, $p < 5\%$). Les barres représentent les écart-types. Gl, Lc et T représentent respectivement les espèces inoculées avec *Glomus intraradices*, l'inoculum local et les témoins non inoculés.

Par contre, on note une dépression de la croissance, avec *G. intraradices*, chez les plants d'*A. nilotica* ($F = 5,19$ et $p = 0,012$), résultat inverse de celui observé en pépinière avec le même traitement.

De même, l'analyse de variance, relative à la croissance du diamètre au collet (Figure 29), montre une dépression chez les plants d'*A. nilotica* inoculés ($F = 11,91$ et $p = 0,0002$).

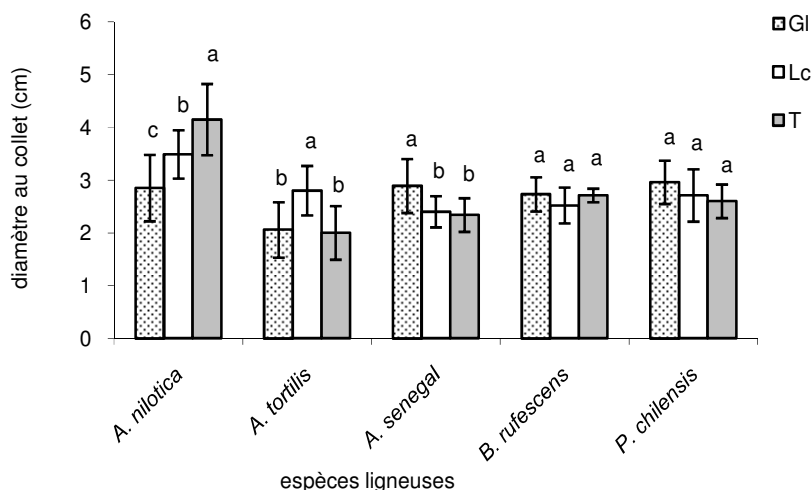


Figure 29 : Effets de la mycorhization sur la croissance du diamètre au collet sur le site

NB : Pour chaque espèce, les colonnes ayant la même lettre ne diffèrent pas significativement (LSD, test de Newman Keuls, $p < 5\%$). Les barres représentent les écart-types. Gl, Lc et T représentent respectivement les espèces inoculées avec *Glomus intraradices*, l'inoculum local et les témoins non inoculés.

Les deux inoculum ont, cependant, significativement stimulé la croissance du diamètre au collet respectivement chez les plants d'*A. tortilis* ($F = 7,88$ et $p = 0,002$) pour l'inoculum indigène et *A. senegal* ($F = 6,12$ et $p = 0,006$) pour *G. intraradices*.

L'analyse de variance révèle aussi que les apports mycorhiziens n'ont eu aucun effet significatif sur les espèces en termes de nombre de ramifications (Figure 30). Les différentes statistiques F et p, avec 10 répétitions de différentes espèces donnent les résultats suivants : *A. nilotica*, 8,30 et 0,0001 ; *A. tortilis*, 0,60 et 0,56 ; *A. senegal*, 1,84 et 0,17 ; *B. rufescens*, 2,58 et 0,094 et *P. chilensis*, 2,14 et 0,13.

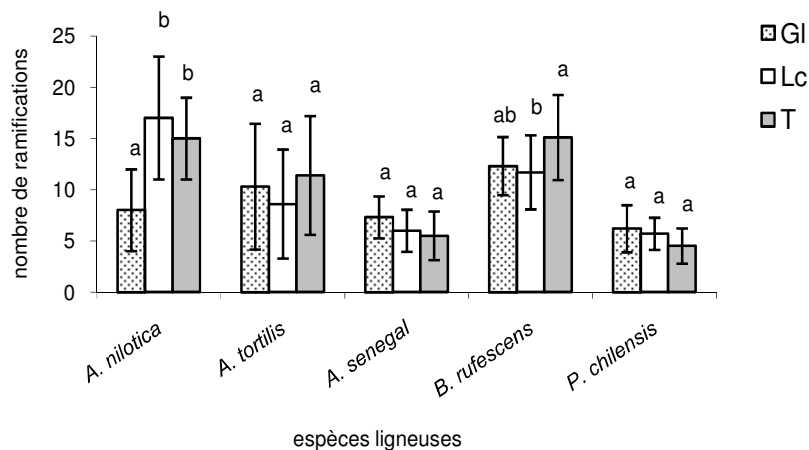


Figure 30 : Nombre de ramifications des plants sur le site selon les traitements

NB : Pour chaque espèce, les colonnes ayant la même lettre ne diffèrent pas significativement (LSD, test de Newman Keuls, $p < 5\%$). Les barres représentent les écart-types. GI, Lc et T représentent respectivement les espèces inoculées avec *Glomus intraradices*, l'inoculum local et les témoins non inoculés.

4.2. Discussion

L'expérimentation a montré que le sol intérieur de la cuvette, utilisé ici comme substrat de culture, contient des propagules de CMA capables de s'associer aux racines des cinq espèces étudiées. Ce sol contient donc une ou plusieurs souches de CMA infectifs.

L'inoculum allochtone, *Glomus intraradices*, est compatible avec les espèces utilisées. Ce résultat concorde avec ceux de Guissou (2001), qui a mis en évidence le potentiel de mycorhization d'une dizaine d'espèces ligneuses sahéniennes inoculées avec *G. intraradices*.

Le substrat de culture non inoculé induit des taux d'infection comparables aux traitements par *Glomus intraradices* et par le complexe de souches indigènes chez toutes les espèces, à l'exception d'*A. senegal* où le traitement au *Glomus intraradices* est meilleur.

Le sol de cuvette de Woro présente donc une capacité de développer naturellement une infection mycorhizienne, avec un taux quasi identique à ceux obtenus par inoculation. Ces résultats ne sont pas en accord avec ceux de Munro *et al.* (1999), qui ont obtenu des taux de mycorhization par inoculation significativement plus importants que le témoin sur un sol non stérilisé, avec des plants d'*Acacia tortilis*.

Cependant, les taux de mycorhization des racines observées, dans notre étude, paraissent faibles, comparés à ceux enregistrés par Diagne et Ingleby (2003) sur les mêmes espèces végétales au Sénégal (entre 39 et 56%) et par Plenchette *et al.* (1989). Cette faible mycorhization pourrait constituer un handicap dans la stabilisation de sol dunaire car, selon

Degens *et al.* (1999), l'accroissement de la stabilité dans l'agrégation des éléments du sol serait largement lié à la croissance des hyphes dans le sable.

Selon Diagne et Ingleby (2003), la faiblesse de l'infection peut s'expliquer par l'utilisation d'un sol plus pauvre en N, P et K dans l'élevage des plants. Pourtant, il est bien connu que la faible disponibilité en P favorise le développement des mycorhizes. Un sol riche en phosphore a une colonisation de mycorhizes plus faible (Guissou, 2001).

Les mêmes auteurs ont mis en évidence la faiblesse de l'endomycorhization (< 45%) en utilisant comme substrat des sols perturbés ou érodés du Nord (Tunisie) et Sud (Sénégal) du Sahara, comparés à des sols non ou peu perturbés (Oasis de Gabès) (jusqu'à 100% d'infection), où la présence de terres arables permet une activité biologique favorable.

Cependant, selon les travaux de Dahiratou (1994), il n'y a pas de corrélation entre intensité de mycorhization et les propriétés physico-chimiques du sol.

La faible infection mycorhizienne observée pourrait aussi être attribuée à la méthode utilisée dans l'estimation du taux de mycorhization. En effet, la méthode Gridline serait plus rapide mais moins précise que celles utilisées dans certains travaux, dont ceux de Kormanik et McGraw (1982) ou de McGonicle *et al.* (1990).

La différence des taux de mycorhization des espèces en pépinière et des arbres adultes pourrait être attribuée aux conditions environnementales des sites qui abritent ces derniers. En effet, la température, le pH, le taux d'humidité ou la disponibilité du phosphore du sol, affectent considérablement le développement de mycorhizes (Dalpé, 1997).

Malgré le faible taux de mycorhization, les résultats relatifs à la biomasse totale produite montrent que les apports mycorhiziens ont induit des effets. Selon certains travaux, il n'est pas nécessaire que le niveau d'infection soit très élevé pour être bénéfique à la plante, particulièrement dans les régions semi-arides (Diagne et Ingleby, 2003). Moore (1988) affirme qu'au delà de 12% de colonisation racinaire, les avantages tirés par la plante hôte ne sont plus sensibles. Hetrick *et al.* (1992), observent également que la croissance des plants n'est pas forcément liée au degré de colonisation de leurs racines par des CMA.

L'apport de *Glomus intraradices* a été le plus efficace dans la production de la biomasse totale chez toutes les espèces, à l'exception de *Bauhinia rufescens*, pour laquelle aucun de traitement n'a eu d'effets significatifs. Le complexe mycorhizien de souches locales n'a été significativement efficace que chez *A. nilotica* et *A. senegal*.

Une production significative de biomasse totale étant largement recherchée dans la fixation des dunes pour un recouvrement rapide et effectif des surfaces, nos résultats encourageraient à une inoculation des plants utilisés à cette fin avec un apport de *G.*

intraradices. Cependant, cet apport n'a pas eu la même efficacité dans la stimulation de la croissance en hauteur en pépinière et sur site, autre objectif à rechercher dans la fixation biologique de dunes. En effet, une croissance rapide permet aux plants d'échapper à l'ensevelissement et de survivre.

L'apport de *G. intraradices* sur *A. senegal* induit, même, une dépression dans la croissance en hauteur de cette espèce en pépinière. Les apports mycorhiziens n'ont pas eu d'effets particulièrement remarquables dans la stimulation de la croissance, aussi bien en pépinière que sur le site. Là encore, nos résultats ne concordent pas avec les conclusions de Munro *et al.* (1999), d'après lesquels l'inoculation mycorhizienne améliore la croissance des plants dans un sol de pépinière non stérilisé.

Cet effet négatif, observé à la suite de deux apports mycorhiziens avec certaines espèces, peut être dû : soit à un déficit en substances carbonées détournées par le champignon (Plenchette, 1991 ; Thomson *et al.*, 1994 ; Cooper, 1984), soit à l'introduction des pathogènes par les apports mycorhiziens (Garbaye, 1991), soit encore à une prédominance de la mycorhization naturelle. Greipsson et El-Mayas (2000) ont observé que la croissance des plants de *Leymus arenarius* est significativement améliorée par un inoculum de CMA indigènes comparé à des inoculums commerciaux. Bell *et al.* (2003) concluent, pour leur part, à une absence d'effet de l'inoculation sur la croissance de plants d'*Acacia sp.* parce que les propagules infectifs de CMA indigènes sont déjà présents dans le sol.

Les apports mycorhiziens sont aussi restés sans effet dans la limitation du taux de mortalité des espèces sur le site. Ces résultats concordent avec ceux de Funatsu *et al.* (2005), qui n'ont trouvé aucune différence significative, au niveau des taux de survie, entre des plants d'*Oenothera laciniata*, inoculés et non inoculés, plantés sur une dune côtière au Japon. Ces auteurs concluent que les mycorhizes ont un effet moindre dans l'établissement de plantes sur les dunes côtières. Ces résultats, ainsi que ceux relatifs à la croissance du diamètre au collet et au nombre de ramifications, suggèrent que les renforts mycorhiziens n'amènent rien de plus ici que les endomycorhizes naturellement présentes dans le sol.

Nos résultats ont aussi montré que les apports mycorhiziens n'ont pas limité la perte d'eau de nos espèces en situation de stress hydrique. Cependant, les travaux de Davies *et al.* (1992) et Subramanian et Charest (1997), concluent que la mycorhization augmente la résistance au stress hydrique. L'hypothèse de l'efficacité de l'inoculum naturel par rapport aux apports mycorhiziens pourrait donc aussi expliquer nos résultats et classerait, dans le même groupe, les trois traitements pour ce qui est de leur efficacité dans le maintien du taux d'hydratation des espèces.

4.3. Conclusion partielle

Cette étude, menée avec l'objectif de tester l'efficacité des apports de CMA de souches contrôlées par rapport à la mycorhization naturelle des plants d'espèces fixatrices des dunes, a montré que le substrat de culture non stérilisé, utilisé dans la zone de Gouré, contient des souches de CMA d'infectivité suffisante.

L'apport du *G. intraradices* serait plus apte à stimuler la production de biomasse totale chez les espèces, mais son efficacité reste toutefois comparable à celle de l'inoculum composite de souches indigènes et à la mycorhization naturelle vis à vis de la stimulation de la croissance en hauteur, ou pour la limitation de la perte d'eau chez les espèces étudiées.

L'inoculation n'est bénéfique que si les souches utilisées sont plus compétitives que les souches existantes dans le sol (Bâ *et al.*, 1996). Il est bien clair que, dans le cadre de cette étude, la mycorhization naturelle doit être privilégiée, car le sol, utilisé comme substrat, contient des CMA apparemment aussi efficaces que les souches importées.



CHAPITRE IV :
CONCLUSION GENERALE
ET PERSPECTIVES

Les résultats de la présente étude montrent que la technique de fixation mécanique de dunes, utilisée dans la zone de Gouré, est efficace en termes de restauration écologique du milieu dunaire.

Les palissades, à base de branchages de *Leptadenia pyrotechnica*, installées comme dispositif anti-érosif, jouent pleinement leur rôle de brise-vent et de piégeage du sable. Après trois années d'observation, elles ont favorisé le retour et la diversité du couvert herbacé. Cependant, il est à noter qu'une maintenance régulière des palissades et une mise en défens du site aménagé, doublé d'un gardiennage, s'avèrent indispensables pour le développement végétal normal et pour aboutir à des résultats, d'autant plus que les abords de dunes constituent généralement des aires de pâturage.

La colonisation herbacée, avec une prédominance d'espèces annuelles, sensibles aux déficits pluviométriques, ne garantit cependant pas le caractère définitif des résultats obtenus et doit être complétée par la plantation d'espèces ligneuses, assurant la pérennité de la fixation.

Les recherches relatives aux espèces ligneuses les mieux adaptées à la fixation biologique de dunes dans la zone de Gouré ont montré que les essences exotiques utilisées (*Prosopis sp.*) sont plus performantes en termes de croissance rapide. Les essences locales d'*Acacia* le sont, quant à elles, en termes de résistance au stress hydrique.

Balanites aegyptiaca et *Bauhinia rufescens* ont le double handicap d'avoir une croissance lente et un faible potentiel à limiter la perte d'eau des tissus pendant des périodes de déficits hydriques.

Trois années après la transplantation sur la dune, les espèces *Acacia* et *Prosopis* ont montré, en général, peu de différences dans les taux de survie. On sait cependant, par expérience, qu'à terme, la croissance plus lente des espèces *Acacia* et la moindre longévité des espèces *Prosopis* qui, de plus, concurrencent les herbacées, sont des handicaps importants, dont il faut tenir compte.

Selon nous, à court et long termes, une combinaison d'*Acacia* et de *Prosopis* est cependant la formule la plus adéquate pour la fixation biologique des dunes dans la zone de Gouré. D'un point de vue pratique, il est néanmoins judicieux de choisir l'espèce *Prosopis chilensis* et de la planter en périphérie des parcelles, qui sont les zones les plus mobiles. Ces espèces, à croissance rapide, ont la capacité de retenir le sable et de rivaliser avec sa montée, et sont aussi résistantes aux agressions du vent. *Acacia sp.* (*A. nilotica* et/ou *A. tortilis*), plus résistants aux déficits hydriques, plus longévifs mais, aussi, plus intéressants d'un point de vue économique, sont à planter au centre des parcelles, zones moins mobiles.

L'étude a aussi mis en évidence la diversité de Glomales de la zone à partir des sols prélevés sous les dix espèces ligneuses. La distribution quantitative des spores, ainsi que la composition des CMA dans les différents sols sont comparables.

Trois des quatre types de spores isolées ont été identifiés : deux appartiennent à la famille des Gigasporaceae et le troisième à celle des Glomaceae, plus précisément au genre *Glomus*.

Avec 56 % du nombre total des spores récoltées, ce dernier représente le genre de Glomales le plus abondant et le plus viable dans les sols de la région.

Le niébé, le sorgho ainsi que mil ont formé des mycorhizes avec l'inoculum produit à partir des échantillons de sols prélevés. Ce dernier a été efficace dans la stimulation de la croissance de la partie aérienne de deux premières espèces mais est resté sans effet sur la troisième.

Enfin, les résultats de l'étude comparative de l'efficacité des apports de CMA de souches contrôlées sur cinq espèces ligneuses fixatrices de dunes par rapport à la mycorhization naturelle ont montré que les souches de CMA contenus dans le substrat de culture non stérilisé sont d'une infectivité comparable à celle de deux autres inoculums (inoculum composite indigène et *G. intraradices*).

Bien que l'apport du *G. intraradices* ait induit une plus grande efficacité dans la production de la biomasse totale chez toutes les espèces (excepté *B. rufescens*), l'efficacité de la mycorhization naturelle reste comparable à celle des souches contrôlées en termes de stimulation de la croissance en hauteur, du diamètre au collet et de la résistance au stress hydrique. Les souches de CMA contenues naturellement dans le substrat de culture seraient donc tout aussi compétitives, contrairement à l'hypothèse formulée à la page 6.

Le sol de pépinière non stérilisé, utilisé comme substrat de culture dans la zone de Gouré, contient donc des souches mycorhiziennes efficaces et le recours à l'inoculation artificielle des plants ne se justifie donc pas.

L'étude réalisée a ainsi permis, pour la première fois, d'évaluer l'efficacité de la fixation mécanique dans la restauration écologique de la dune, d'étudier le comportement des différentes espèces fixatrices de dune, de mettre en évidence le statut mycorhizien de ces espèces, ainsi que la diversité de Glomales dans les sols, mais aussi les potentialités de mycorhization naturelle des sols dans la zone de Gouré. Ceci constitue une avancée significative dans la maîtrise de certains aspects liés à la réussite de la fixation de dunes, notamment les paramètres techniques de la barrière mécanique, la sélection d'espèces adaptées ou l'introduction de la mycorhization.

Cependant, la prudence doit être de mise dans l'interprétation de certains résultats car plusieurs facteurs, notamment environnementaux et pédologiques, biotiques ou abiotiques, n'ont pu être entièrement maîtrisés dans les conditions *in vivo* de l'étude, et auraient pu influencer sur les résultats.

Des études complémentaires seraient à envisager pour confirmer et affiner nos conclusions :

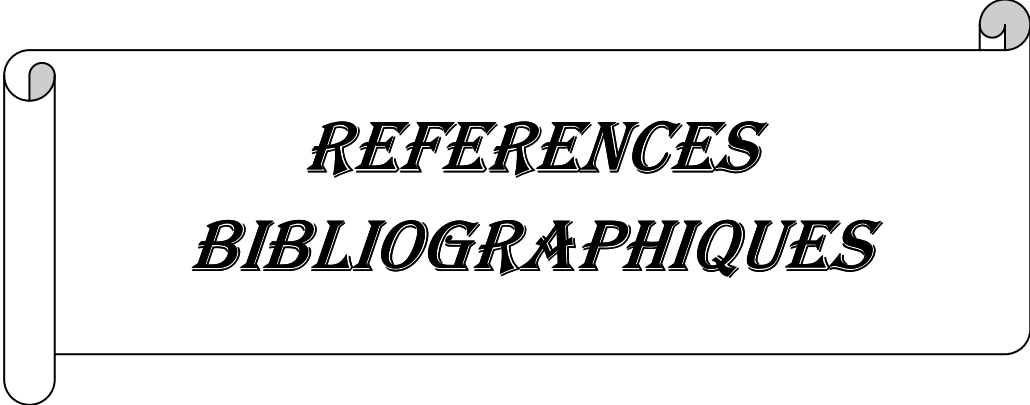
- Le travail s'est limité à évaluer l'efficacité de la fixation mécanique alors que, dans le long terme, c'est la fixation biologique qui pérennise la stabilisation de la dune. Une étude sur l'évaluation de l'efficacité de la fixation biologique s'avère donc nécessaire et complémentaire. Une étude d'impact de différentes espèces utilisées sur la vitesse de vents, le transport de flux éoliens ainsi que sur l'évolution structurale des sols, permettrait d'affiner la sélection d'espèces les plus appropriées à la fixation biologique de dunes.
- La résistance des espèces au stress hydrique a été étudiée en pépinière, dans des conditions non représentatives des conditions hydriques normales de la dune. Une étude sur les fluctuations du niveau de la nappe phréatique de la dune et des comportements des espèces ligneuses, permettrait une utilisation adéquate des espèces compatibles suivant les profils hydriques des dunes. Ce qui réduirait les risques d'échec des plantations.
- L'identification des CMA par des critères uniquement morphologiques n'est pas suffisamment précise et formelle. Nos résultats sur l'identification et la variabilité des Glomales des sols de Gouré sont donc orientatifs. Une étude complémentaire basée sur la caractérisation moléculaire pourrait être envisagée pour analyser la variabilité génétique des Glomales contenues dans les sols de cette région.
- Dans cette étude, la mycorhization naturelle a été efficace. Une étude complémentaire serait souhaitable pour isoler et multiplier le (ou les) CMA contenu (s) dans le substrat de culture, et tester l'efficacité de l'inoculum ainsi produit.
- Selon la littérature, la double inoculation CMA-rhizobium accroît la biomasse totale des plants mieux que celle de l'un ou l'autre de deux symbiotes. Evaluer les effets de la double inoculation CMA-rhizobium sur les espèces fixatrices de dunes pourrait constituer un pas de plus dans la recherche des voies de stimulation de la croissance accélérée des plants en matière de fixation de dunes.

Il faut aussi noter que la réussite de fixation des dunes dans cette partie du Niger reste, en grande, intimement liée à la durabilité de la barrière mécanique. Le maintien en bon

état des palissades constitue le premier défi à relever face à la pression humaine et animale. La mise en défens et un entretien régulier deviennent alors plus que nécessaires.

Notons, enfin, que la lutte contre l'ensablement dans le département de Gouré est loin d'être gagnée. Le phénomène prend de l'ampleur et la réponse apportée demeure très limitée et très ponctuelle. Ainsi, d'après le SAA Gouré (2002), 110 000 ha (soit 80 %) de sols de ce département seraient menacés par l'ensablement, alors le taux de réhabilitation n'est entrepris que sur 0,3% des sols en cours de dégradation (CNEDD, 1997). Cette intervention timide et très disproportionnée pourrait s'expliquer d'une part, par l'impact limité des différentes interventions et, d'autre part, par la faible mobilisation des ressources financières probablement dûe au coût élevé de la fixation mécanique et biologique des dunes, calculé entre 205 000 F CFA (312,52 €) (Ichaou et Guibert, 2009) et 261 250 F CFA (398,27 €) (Djibo, 2007) l'hectare.

Une mobilisation beaucoup plus importante, à la hauteur de ce risque de cataclysme écologique qui guette les habitants de ce département en particulier et, au delà, toutes les populations du Sud-est nigérien, s'avère indispensable. Il est indispensable de mobiliser toutes les ressources disponibles dans les années à venir, de manière à mettre réellement en place des stratégies d'adaptation aux conséquences du réchauffement climatique, dont les effets devraient conduire à une aridification structurelle de la zone d'étude, à l'instar de toute la bande sahélienne (Held *et al.*, 2005) et de la plus grande partie des zones arides et semi-arides dans le monde (Giec, 2007).



REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

- Al-Afifi, M. A., Haffar, I., Murai, H., Itani, S. and Yokota, H., (1990):** Use of date-fronds mat fence as a barrier for wind erosion control. 2. Effect of barrier density on microclimate and vegetation. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, **33**: 47–55.
- An, Z. Q. and Hendrix, J. W., (1988):** Determining the viability of endogonaceous spores with a vital stain. *Mycologia*, **80**: 259-261.
- Arbonnier, M., (2002) :** Arbres, arbustes et lianes des zones sèches d'Afrique de l'Ouest. 2è ed. Montpellier : *CIRAD - MNHN*.
- Arnon, M. V., (1990) :** Les nappes aquifères à l'Ouest de l'Aïr, 2è partie : La nappe des grès d'Agadez. Synthèse hydrogéologique et étude prévisionnelle d'exploitation par modèle mathématique, PNUD/DCTD et MHE, Août 1990, 26 pp.
- Aubreville, A., (1950) :** *Flore forestière soudano-guinéenne. AOF-Cameroun-AEF*. Paris : *Soc. d'Editions géographiques, maritimes et coloniales*, 254 pp.
- Bâ, A. M., Dalphé, Y., and Guissou, T., (1996) :** Les Glomales d'*Acacia holosericea* et d'*Acacia mangium*. *Bois et Forêts des Tropiques*, **250**: 5-18.
- Bâ, A. M., Plenchette, C., Danthu, P., Duponnois, R., and Guissou, T., (2000) :** Functional compatibility of two arbuscular mycorrhize with thirteen fruit trees in Senegal. *Agroforestry Systems*, **50**: 95-105.
- Bell, J., Wells, S., Jasper, D. A., and Abbott, L. K., (2003):** Field inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi in rehabilitation of mine sites with native vegetation, including *Acacia spp.* *Australian Systematic Botany*, **16**: 131-138.
- Berger, A., Grouzis, M., and Fournier, C., (1996) :** Evolution spacio-temporelle des peuplements d'*Acacia tortilis* (Forssk.) Hayne *raddiana* (Savi.) Brenan dans les monts Ougarta (Sahara nord-occidental). *Sécheresse*, **12**: 607-627.
- Bergeret, A. and Ribot, J. C., (1990) :** L'arbre nourricier en pays sahélien. Paris : *Maison des sciences de l'homme*, 237 p.
- Bernus, E., (1981) :** Touaregs nigériens. Unité culturelle et diversité régionale d'un peuple pasteur. Paris, *Mémoires Orstom*, n°94 : 508.
- Bernus, E. and Hamidou, S. A., (1980) :** Atlas du Niger : *Jeunes Afrique*, 64 pp.
- Bodart, C., (2004) :** Étude de l'ensablement dans la région de Gouré (Sud-Est du Niger) : processus et apport de la télédétection. Mémoire de Licence en Sciences Géographiques, Faculté des Sciences Géographiques, Université de Liège. 149 pp.
- Boukhris, M., (1967) :** Sur l'écologie et la nutrition des végétaux croissant sur dolomie dans le Sud de la France. Thèse de doctorat de spécialité, Faculté des Sciences de Montpellier.

- Boureima, I., Ibrahim, L., and Tandja, M. S., (1997)** : Bilan Diagnostic environnemental de l'arrondissement de Gouré. *CNEDD*, Niamey.
- Charest, C., Dalpé, Y., and Brown, A., (1993)**: The vesicular-arbuscular mycorrhizae and chilling on two hybrids of *Zea mays* L. *Mycorrhizae*, **4**: 89-92.
- Colonna, J. P., Ducouso, M., and Badji, S., (1991)** : Peut-on améliorer la croissance de l'*Acacia senegal* (L.) Willd. et du système symbiotique '*Acacia senegal* - Rhizobium'. *Fonds Documentaire ORSTOM*, Bx 14318 Ex. 1.
- CNEDD (1997)** : Etude du bilan diagnostic de l'environnement pour un développement durable de Zinder, Plan National de l'Environnement pour un Développement Durable Régional (PNEDD/R), CNEDD- Département de Zinder, République du Niger. 145 pp
- CNEDD (2003)** : Plan National de l'Environnement pour un Développement Durable, Conseil National de l'Environnement pour un Développement Durable (CNEDD), République du Niger-PNUD.
- Cooper, K. M., (1984)**: Physiology of VA mycorrhizal association, *In: VA mycorrhizae*, Eds Powell, C. L. and Bagyaraj, D. J., *C R C Press, Inc.* Bota Raton, Florida, 155-186.
- Cordell C. E., Marx D. H., Maul S. B., Owen J. H., (1987)**: Production and utilization of ectomycorrhizal fungal inoculum in the eastern United States. *Proceedings of the 7th North American Conference on Mycorrhizae* (Gainesville, Florida), University of Florida 287-289
- Cornet, F., Diem, H. G., and Dommergues, Y. R., (1982)** : Effet de l'inoculation avec *Glomus mossae* sur la croissance d'*Acacia holosericea* en pépinière et après transplantation sur le terrain. *In* INRA (ed.), *Les mycorhizes : biologie et utilisation*. Dijon, 287-293.
- Dahiratou, I. D., (1994)** : Contribution à l'étude de l'endomycorhization vésiculo-arbusculaire de quelques spermatophytes sahéliennes. Thèse de doctorat, Université de Mons-Hainaut, Belgique. 98 pp.
- Dai, A., Trenberth, K. E., and Karl, T. R., (1998)**: Global variations in droughts and wet spells: 1900-1995. *Geophysical Research Letters*, **25**: 3367-3370.
- Dalpé, Y., (1997)** : Biodiversité des champignons mycorhiziens. Centre de recherches de l'est sur les céréales et les oléagineux (CRECO), Gouvernement du Canada, Ottawa, Ontario, Canada, KIA 0C6. 13 pp.
- Davies, F. T., Potter, J. R., and Linderman, R. G., (1992)**: Drought resistance of mycorrhizal pepper plants independent of leaf P concentration-response in gas exchange and water relations. *Physiologia Plantarum*, **87**: 45-53.

- Davis, E. A. and Young, J. L., (1985):** Endomycorrhizal colonisation of glass-house grown wheat as influenced by fertilizer salts when banded or soil mixed. *Can. J. Bot.* **63**: 1196-1203.
- De Fabregues, (1979) :** *Lexique des plantes du Niger*. Niamey: INRAN, B.P, 156 pp.
- Degens, B. P., Sparling, G. P., and Abbott, L. K., (1999):** Increasing the length of hyphae in a sandy soil increases the amount of water-stable aggregates. *Applied Soil Ecology*, **3**: 149-159.
- Dehne, H. W., (1982):** Interaction between vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi and plant pathogens. *The American Phytopathology Society*, **72** (8): 1115-1118.
- Diaga, D., Tahir, A. D., and Ibrahima, N., (2003):** Actinorrhizal, mycorrhizal and rhizobial symbioses: how much do we know? *African Journal of Biotechnology*, **2** (1): 1-7.
- Diagne, O. and Ingleby, K., (2003):** Ecologie des champignons mycorrhiziens arbusculaires infectant *Acacia raddiana*. . In Grouzis, M. and Floc'H, L. (eds.), *Un arbre au désert*. Paris: IRD Editions, 205-228.
- Diallo, A. T., Samba, P. I., and Ducouso, M., (1999):** Arbuscular mycorrhizal fungi in the semi-arid areas of Senegal. *European Journal of Soil Biology*, **35** (2): 65-75.
- Diem, H. G. and Cornet, F., (1982):** Etude comparative de l'efficacité des souches de *Rhizobium* d'*Acacia* isolées de sols du Sénégal et effet de la double symbiose *Rhizobium-Glomus mosseae* sur la croissance de *Acacia holosericea* et *Acacia raddiana*. *Bois et Forêts des Tropiques*, **198**: 3-15.
- Diem, H. G., Guèye, I., Gianinazzi-Pearson, V., Fortin, J. A., and Dommergues, Y. R., (1981):** Ecology of VA mycorrhizae in the tropics: the semi-arid zone of Senegal. . *Acta oecol., oecol. Plant*, **2**: 53-62.
- Dinh, L. C., (1998) :** Fixation des dunes vives par *Casuarina equisetifolia* au Vietnam, *Bois et Forêts des Tropiques*, **256** (2) : 35-41.
- Diop, T. A., (1996) :** Les mycorhizes à vésiculees et arbscules. . *J Fac Sci Dakar, Univ. Cheikh Anta Diop*, **2**: 49-64.
- Diop, T. A., Simoneau, P., Dalpé, Y., Plenchette, C., and Strullu, D. G., (1998):** Biodiversité et variabilité génétiques des Glomales associés à *Acacia albida* Del. au Sénégal. In Campa, C., Grignon, C., Gueye, M., and Hamon, S. (eds.), *L'Acacia au Sénégal*. Paris : *Colloques et séminaires, ORSTOM Editions*, 423-442.
- Diouf, M., (1996) :** Etude du fonctionnement hydrique et réponses à l'aridité des ligneux sahéliens. Cas de *Acacia raddiana* en zone soudano-sahélienne du Sénégal, Thèse de 3è cycle UCAD, Dakar. 172 p.

- Djambouto, B. (2006)** : Etudes socio-économiques des cuvettes de Gouré. Mémoire de fin d'étude, Université Abdou Mounmouni, Niamey, pp. 55
- Djibo, E., (2007)** : Proposition de choix technico-financier d'une opération de fixation de dunes au sud-est du Niger. Mémoire de DES, Faculté Universitaire des Sciences Agronomiques de Gembloux, Gembloux, Belgium. 45 pp.
- Doran, J. C., Boland, D. J., Turnbull, J. W., and Gunn, B. V., (1983)** : Guide des semences d'acacia des zones sèches : Récolte, extraction, nettoyage, conservation et traitement des graines d'acacias des zones sèches : *FAO*, Q2190/F, 127 pp.
- Ducouso, M., (1991)**: *Importance des symbioses racinaires pour l'utilisation des acacias d'Afrique de l'Ouest*. Nogent-sur-Marne, Dakar, France, Sénégal: CIRAD-Forêt/ISRA, 205 pp.
- Duponnois, R., and Cadet, P., (1994)** : Interactions of *Meloidogyne javanica* and *Glomus* sp. on growth and N₂ Fixation of *Acacia seyal*. *Afro-Asian Journal of Nematology*, **4 (2)** : 228-233.
- Duponnois, R., Plenchette, C., Prin, Y., Ducouso, M., Kisa, M., Bâ, A. M., and Galiana, A., (2007)** : Use of mycorrhizal inoculation to improve reforestation process with Australian Acacia in Sahelian ecozones. *Ecological engineering*, **29**: 105-112.
- FAO, (1988)** : Guide des Techniques de lutte contre l'ensablement pour la fixation des dunes. Rome : *FAO*, 57 pp.
- FAO, (1993)** : Evaluation de l'efficacité des techniques de lutte contre l'ensablement au niveau des pays membres du Projet RAB/89/034 ; Stabilisation des dunes de sable et reboisement. *FAO*, Rome.
- FAO, (2001)**: State of the world's forest 2001. *FAO*, Rome, 181 pp.
- FAO, (2004)**: *FAOSTATS - Statistics Database*. URL <http://apps.fao.org/>
- FAO, (2006)** : Evaluation des ressources forestières mondiales 2005 : Progrès vers la gestion forestière durable. *FAO*, Rome, 320 pp.
- Felker, P., (1981)**: Uses of tree legumes in semiarid regions. *Econ. Bot.*, **35**: 174-186.
- Fokom, R., Jemo, M., Nana Wakam, L. N. and Nwaga, D., (2007)** : Effet de la mycorrhization et d'un flavonoïde sur l'assimilation du phosphore, de l'azote et du métabolisme des composés phénoliques du niébé. Séminaires sur Biotechnologies et maîtrise des intrants agricoles en Afrique centrale organisés par le Réseau de chercheurs Biotechnologies végétales : amélioration des plantes et sécurité alimentaire (BIOVEG), l'IRD, l'AUF, l'Université de Yaoundé I, l'Institut de recherche

agronomique pour le développement, CRESA Forêt-Bois du 17-19 décembre, Yaoundé, Cameroun

- Fortin, J. A., Piché, Y., and Plenchette, C., (2008)** : Les mycorhizes : la nouvelle révolution verte : *Editions Multimondes*, 128 pp.
- Fryrear, D. W., (1995)**: Soil losses by wind erosion. *Soil Science Society of America Journal*, **59**: 668-672.
- Funatsu, Y., Nakatsubo, T., Yamaguchi, O., and Horikoshi, T., (2005)**: Effects of arbuscular mycorrhizae on the establishment of the alien plant *Oenothera laciniata* (Onagraceae) on a Japanese coastal sand dune. *Journal of Coastal Research*, **21**: 1054-1061.
- Furlan, V., (1981)** : Techniques et procédures pour la culture des champignons endomycorhiziens. Notes techniques. *Québec, Canada, Université Laval* : 54-65.
- Gaye, A., Sall, P. N., and Ndiaye Samba, S. A., (1998)**: Bilan des recherches sur les introductions d'acacias australiens au Sénégal. In Campa, C., Grignon, C., Gueye, M., and Hamon, S. (eds.), *L'Acacia au Sénégal*. Paris : *Colloques et séminaires, ORSTOM Editions*, 137-158.
- Garbaye, J., (1991)** : Utilisation des mycorhizées en sylviculture. In Strullu, D. G., Garbaye, J., Perrin, P., and Plenchette, C. (eds.), *Les mycorhizes des arbres et plantes cultivées*. Paris: *Lavoisier*, 197-248.
- Gaur, A., Van Greuning, J. V., Sinclair, R. C., and Eicker, A., (1999)**: Arbuscular mycorrhizas of *Vangueria infausta* Burch. subsp. *Infausta* (Rubiaceae) from South Africa. *S. Afr. J. Bot.*, **65** (5): 1-3.
- Gavaud, M., (1964)** : Etude pédologique du Niger Oriental. Rapport Général, *ORSTOM*, Paris.
- Gemma, J. N. and Koske, R. E., (2002)**: Arbuscular Mycorrhizae in Sand Dune Plants of the North Atlantic Coast of the U.S.: Field and Greenhouse Inoculation and Presence of Mycorrhizae in Planting Stock. *Journal of Environmental Management*, **50**: 251-264.
- Gerdemann, J. W., (1975)**: Vesicular-arbuscular mycorrhizae In Torrey, J. C. and Clarkson, D. T. (eds.), *The development and function of roots*. New York and London: Academic Press, 575-579.
- Gerdemann, J. W. and Trappe, J. M., (1974)**: The endogonaceae in the Pacific Northwest. *Mycologia Memoir*, **5**: 1-76.
- GIEC, (2007)** : Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts

- intergouvernemental sur l'évolution du climat (Équipe de rédaction principale, Pachauri, R.K. et Reisinger, A.). GIEC, Genève, Suisse, ..., 103 pages.
- Giovanetti, M. and Mosse, B., (1980):** An evaluation of techniques for measuring vesicular-arbuscular mycorrhizal infection in roots. *New Phytol*, **84**: 489-500.
- Gommes, R., (1998):** Some aspects of climate variability and food security in the sub-Saharan Africa. In Demaree, G., Alexandre, J., and De Dapper, M. (eds.), *Tropical Climatology, Meteorology and Hydrology: Royal Meteorological Institute of Belgium / Royal Academy of Overseas Sciences*, 655-673.
- Greipsson, S. and El-Mayas, H., (2000):** Arbuscular mycorrhizae of *Leymus arenarius* on coastal sands and reclamation sites in Iceland and response to inoculation. *Restoration ecology*, **8**: 144-150.
- Grouzis, M., (1984):** *Restauration des pâturages sahéliens. Synthèse des travaux de reboisement dans la région de Markoye (Burkina Faso)*. Rapport multigraph., ORD-Sahel-Orstom-FED, Ouagadougou, 26 P.
- Grouzis, M. and Akpo, E., (1998):** Dynamique des interactions arbre-herbe en milieu sahélien. Influence de l'arbresur la structure et le fonctionnement de la strate herbacée. In Campa, C., Grignon, C., Gueye, M., and Hamon, S. (eds.), *L'Acacia au Sénégal*. Paris: *Colloques et séminaires, ORSTOM Editions*, 37-46.
- Grouzis, M. and Le Floc'h, E., 2003:** Bilan et Perspectives. In Campa, C., Grignon, C., Gueye, M., and Hamon, S. (eds.), *L'Acacia au Sénégal*. Paris: IRD Editions, 309-313.
- Grouzis, M., Diouf, M., Berger, A., and Rocheteau, A., (1998):** Fonctionnement hydrique et réponses des ligneux sahéliens à l'aridité. In Campa, C., Grignon, C., Gueye, M., and Hamon, S. (eds.), *L'Acacia au Sénégal*. Paris: *Colloques et séminaires, ORSTOM Editions*, 47-61.
- Guissou, T., (1994):** Amélioration de la fixation d'azote chez deux acacias australiens: *Acacia holosericea* et *Acacia mangium*. Mise en évidence d'une diversité de *Glomales* dans des sols du Burkina Faso. Mémoire de fin d'études d'ingénieur des Eaux et Forêts, Université de Ouagadougou. 49 pp.
- Guissou, T., (1996) :** Dépendance mycorhizienne des fruits *Parkia biglobosa* (Jacq.) Benth, *Tamarandus indica* L. et *Ziziphus mauritiana* Lam. dans un sol déficient en phosphore assimilable. Mémoire de DEA de Biologie végétale, Université de Ouagadougou. 37 pp.
- Guissou, T., (2001) :** La symbiose mycorhizienne à arbuscules chez des espèces ligneuses : diversité des *Glomales*, dépendance mycorhizienne, utilisation des phosphates naturels

- et tolérance à un stress hydrique, Thèse de doctorat, Université de Ouagadougou, Burkina Faso. 124 pp.
- Hamel, C. and Plenchette, C., (2007):** Mycorrhizae in Crop Production: Edit. *Haworth Food & Agricultural Products Press*, 366 pp.
- Harley, J. L., and Smith, S. E., (1983):** Mycorrhizal symbiosis. New York, Academic Press, 483 pp.
- Haselwandter, K., and Bowen, G. D., (1996):** Mycorrhizal relations in trees for agroforestry and land rehabilitation. *Forest Ecology and management*, **81**: 1-17.
- Held, I. M., Delworth, T. L., Lu, J., Findell, K. and Knutson, T. R. (2005):** Simulation of Sahel drought in the 20th and 21st centuries. *Proc. Nat. Acad. Sci. (USA)*, **102**: 17891-17896.
- Hetrick, B. D. A., Wilson, G. W. T., and Cox, T. S., (1992):** Mycorrhizal dependency of modern wheat varieties, landraces and ancestors. *Canadian Journal of Botany*, **70**: 2032-2040.
- Hien, F., (1984) :** Contribution à l'agroforesterie en Haute Volta : essai de mise en place des haies vives et brise-vent. Mémoire de fin d'études ISP, Université de Ouagadougou, Burkina Faso. 160 pp.
- Hiernaux, P., (1998):** Effects of grazing on plant species composition and spatial distribution in rangelands of the Sahel. *Plant Ecol*, **138**: 191-202.
- Hountondji, Y. C., Ozer, P., Nicolas, J., (2004) :** Mise en évidence des zones touchées par la désertification par télédétection a basse résolution au Niger. *Cybergeo : Revue européenne de géographie*, 291 : 1-18
- Hulme, M., (1996):** Recent climatic change in the world's drylands. *Geophysical Research Letters*, **23**: 61-64.
- Ichaou, A. and Guibert, B., (2009) :** De la dune fixée à la cuvette retrouvée: l'exemple du Projet d'Appui à la Gestion des Ressources Naturelles au Niger. ONG Karkara, Ed. Gapi (La Primaube, France). 47 pp.
- Ickowicz, A., Friot, D., and Guérin, H., (2005) :** Acacia senegal, arbre fourrager sahélien ? *Bois et Forêts des Tropiques*, **284** (2) : 59-69.
- Iktam, A. and Kho, R. (1996):** Rapport d'activités 1996. Département de recherches forestières, INRAN, 40p.
- INS, (2007) :** Le Niger en chiffres : Institut national des statistiques, Niger.
<http://www.stat-niger.org/>

- Jahiel, M., (1984)** : Intérêt particulier du palmier dattier dans les zones en cours de désertification : Cas de la cuvette de Kojimeri à Mainé Soroa. Mémoire de DEA, Université du Languedoc. 48 pp.
- Jahiel, M., (1998)** : Rôle du palmier dattier dans la sécurisation foncière et alimentaire au Sud-Est du Niger. *Sécheresse*, **9**: 167-174.
- Johnson, N. C., Zak, D. R., Tilman, D., and Pflieger, F. L., (1991)**: Dynamics of vesicular-arbuscular mycorrhizae during old field succession. *Oecologia*, **86**: 349-358.
- Kabir, Z. and Koide, T., (2000)**: The effects of dandelion or a cover crop on mycorrhiza inoculum potential, soil aggregation and yield of maize. *Agricultural, Ecosystems and Environment*, **78** (2) : 167-174.
- Karimoune, S., (1994)** : Contribution à l'étude géomorphologique de la région de Zinder (Niger) et analyse par télédétection de l'évolution de la désertification. Thèse de doctorat en Sciences géographiques, Université de Liège, Liège.
- Karimoune, S. and Ozer, A., (1994)** : L'apport de la télédétection à l'étude des modelés éoliens du Niger méridional, in *Télédétection de l'environnement dans l'espace francophone* : Presse de l'université du Québec, 31-54.
- Khan, A. G., (1974)**: Occurance of mycorrhizas in Halophytes, Hydrophytes and Xérophytes and of *Endogones* spores in adjacent soils. *J. Gen. Microbiol.*, **81**: 7-14.
- Khan, Q. Z., (1999)**: Evaluation of different mountants for preservation of VAM fungi. *Annals of Plant Protection Sciences*, **17** (1): 63-66.
- Kormanik, P. P., Bryan, W. C., Schultz, R. C., (1979)**: Procedures and equipment for staining large numbers of plant root samples for mycorrhizal assay. *Can. J. Microbiol.*, **26**: 537-538.
- Kormanik, P. P. and Mc Gray, A. C., (1982)**: Quantification of vesicular-arbuscular mycorrhizae in plant roots. In Schenck, N. (ed.), *Methods and principles of mycorrhizal research* St. Paul, Minnesota: *The American Phytopathological Society*, 37-45.
- Krishna, K. R. and Dart, P. J., (1984)**: Effect of mycorrhizal inoculation and soluble phosphorus fertilizer on growth and phosphorus uptake of pearl millet. *Plant Soil*, **81**: 247-256.
- Krishna, K. R., Shetty, K. G., Dart, F. J., Andrews, D. J., (1985)**: Genotype dependent variation in mycorrhizal colonization and response to inoculation of pearl millet. *Plant Soil*, **86**: 113-125.

- Lahlou, A., (2000) :** Désertification dans les pays du Maghreb In : Quelques aspects environnementaux dans les pays du Maghreb, - *ISESCO- 1421H/2000*.
- Laminou, M. O., (2003) :** Etude critique des causes d'échec des tentatives de fixation biologique dans le Sud-Est du Niger. Mémoire de DES, Faculté Universitaire des Sciences Agronomiques de Gembloux, Gembloux, Belgium. 43pp.
- Lancaster, N. and Baas, A., (1998):** Influence of vegetation cover on sand transport by wind: Field studies at Owens Lake, California. *Earth Surface Processes and Landforms*, **23**: 69-82.
- Larwanou, M., (1994):** Potentials of *Prosopis africana* leaf litter for soil nutrient enhancement and crop development. M.Sc thesis, Department of Forest resources Management, University of Ibadan, Ibadan. 95 pp.
- Lawandi, K., (2006):** Processus d'ensablement des cuvettes dans la région de Gouré, et suivi de la dynamique par télédétection. Mémoire de fin d'étude, Université Abdou Moumouni, Niamey, 134 pp.
- Le Houerou, H. N., (1996):** Climate change, drought and desertification. *Journal of arid environments*, **34**: 133-185.
- Legendre, P. and Legendre, L., (1998):** Numerical ecology. *Developments in Environmental Modelling*, **20**: 235-245.
- Leyval, C., Weinenhorn, I., Glashoff, A. And Berthelin, J., (1994):** Influence of heavy metalson germination of arbuscular-mycorrhizal fungalspores in siols. *Acta Bot. Gallica*, 141: 523-528.
- Li, X. R., Xiao, H. L., He, M. Z., Zhang, J. G., (2006):** Sand barriers of straw checkerboards for habitat restoration in extremely arid desert regions. *Ecological Engineering*, **28**: 149–157.
- Liu, R. J., (1995):** Effects of vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi on verticillium wilt of cotton. *Mycorrhiza*, **5**: 293-297.
- M'Baré, C. O., (2001) :** Situation des ressources génétiques forestières de la Mauritanie, Atelier sous-régional FAO/IPGRI/CIRAF sur la conservation, la gestion, l'utilisation durable et la mise en valeur des ressources génétiques forestières de la zone sahélienne. Ouagadougou (22-24 sept. 1998) : Service de la mise en valeur des ressources forestières, Division des ressources forestières. FAO, Rome, 37.
- Mahamane, A., Ichaou, A., Ambouta, K., Mahamane, S., Morou, B., and Amani, I., (2007) :** Indicateurs écologiques de la période optimale de remise en culture de jachères au Niger. *Sécheresse*, **18** (4) : 289-295.

- Mainguet, M., (1995)** : L'homme et la sécheresse. Paris : *Masson*, 335 pp.
- Mainguet, M. and Dumay, F., (2007)** : Combattre l'érosion éolienne : un volet de la lutte contre la désertification. *Comité Scientifique Français de la Désertification (CSFD)*. Dossier thématique N°3.
- McGonicle, T. P., Miller, M. H., Evans, D. G., Fairchild, G. L., and Swan, J. A., (1990)**: A new method which gives an objective measure of colonization of roots by vesicular-arbuscular fungi. *New Phytol*, **115**: 1569-1574.
- Meunier, J. and Rognon, P., (1995)** : Une nouvelle méthode de lutte contre l'ensablement. *Sécheresse*, **2** : 223-227.
- Meunier, J. and Rognon, P., (2000)**: Une méthode écologique pour détruire les dunes mobiles. *Sécheresse*, **11** (4): 309-316.
- Michels, K., Lamers, J., Allison, B. E., and VenDenBeldt, R. J., (1993)** : La lutte contre l'érosion éolienne au Niger : Les savoirs des chercheurs et des paysans, *10ème réunion du Réseau Erosion*. Montpellier: *ORSTOM Réseau Erosion*. Bulletin. Hrsg : ORSTOM, 22 - 29.
- Michels, K., Lamers, J. P. A., and Buerkert, A., (1998)**: Effects of Windbreak Species and Mulching on Wind Erosion and Millet Yield in the Sahel. *Experimental Agriculture*, **34**: 449-464.
- MH/E, (1994)** : Le programme de lutte contre l'ensablement des terroirs et d'aménagement des cuvettes dans les départements de Zinder et Diffa, Mai 1994, Ministère de l'Hydraulique et de l'Environnement (MHE)/FAO, République du Niger.
- MH/E, (1995)** : Environnement et devenir du Niger : Bilan-diagnostic et perspectives sur les politiques et stratégies environnementales, Ministère de l'Hydraulique et de l'Environnement du Niger (MHE), République du Niger, 57 pp.
- Moore, J. C., (1998)**: Plant succession in semi-arid grasslands and response to mycorrhizal colonization, *Abstracts Ecological Society of America Meeting*. Davis, CA, USA, 312p.
- Morel, R., (1998)**: Début de la sécheresse en Afrique de l'Ouest. In Demarée, G., Alexandre, J., and De Dapper, M. (eds.), *Tropical Climatology, Meteorology and Hydrology*: Royal Meteorological Institute of Belgium / Royal Academy of Overseas Sciences, 200-211.

- Morton, J. B., (1992):** Problems and solutions for integration of glomalean taxonomy, systematic biology, and the study of endomycorrhizal phenomena. *Mycorrhiza*, **2**: 97-109.
- Morton, J. B., Bentivenga, S. P., and Wheeler, W. W., (1993):** Germplasm in the international collection of vesicular-arbuscular mycorrhizal (INVAM) and procedures for culture development, documentation and storage. *Mycotaxon*, **48**: 491-528.
- Munro, R. C., Wilson, J., Jefwa, J., and Mbuthia, K. W., (1999):** A low-cost method of mycorrhizal inoculation improves growth of *Acacia tortilis* seedlings in the nursery. *Forest Ecology and management*, **113**: 51-56.
- Murai, H., Al-Afifi, M. A., Haffar, I. and Yoshizaki, S., (1990):** Use of date-fronds mat fence as a barrier for wind erosion control. 1. Effect of barrier density on sand movement stabilization. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, **32**: 273–282.
- Musoko, M., Last, F. T., and Mason, P. A., (1994):** Populations of spores of vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi in undisturbed soils of secondary semideciduous moist tropical forest in Cameroon. *Forest Ecology and management*, **63**: 359-377.
- Ndour, P. and Danthu, P., (1998):** Effets des contraintes hydrique et saline sur la germination de quelques acacias africains. In Campa, C., Grignon, C., Gueye, M., and Hamon, S. (eds.), *L'Acacia au Sénégal*. Paris: *Colloques et séminaires, ORSTOM Editions*, 105-122.
- Nicholson, S. E., (1985):** Sub-Saharan rainfall 1981-84. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, **24**: 1388-1391.
- Nouaim, R. and Chaussod, R., (1996):** Rôle des mycorhizes dans l'alimentation hydrique et minérale des plantes, notamment des ligneux de zones arides. *Cahiers Options méditerranéennes*, Vol. 20 Séminaire.
- Okali, D. U. U. and Dodoo, G., (1973):** Seedling growth and transpiration of two West African mahogany in relation to water stress in the root medium. *J. Ecol*, **61**: 421-438.
- Omar, M. B., Bolland, L., and Heather, W. A., (1979):** A permanent mounting medium for fungi. *Bull. Br. Mycol. Soc.*, **13**: 31-32.
- Ozer, P., (1993):** Contribution à l'étude de la désertification en région sahélienne. Le cas du Niger. Problèmes posés par les précipitations et les lithométéores, Mémoire de licence en Sciences géographiques, Université de Liège, Liège.
- Ozer, P., (1998):** Lithometeors and wind velocity in relation with desertification during the dry season from 1951 to 1994 in Niger. In Demarée, G., Alexandre, J., and De Dapper,

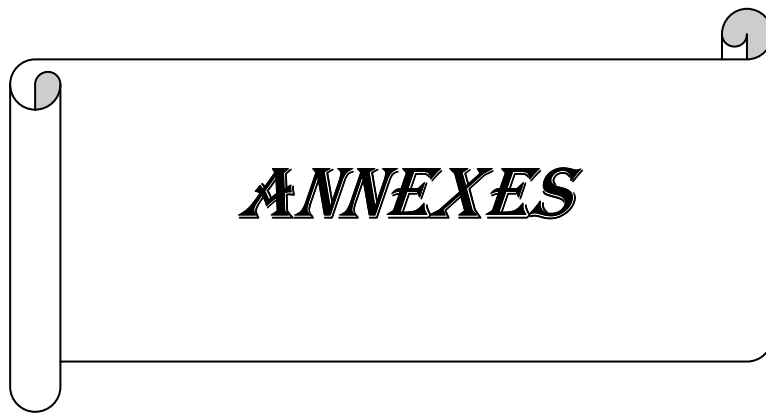
- M. (eds.), *Tropical Climatology, Meteorology and Hydrology: Royal Meteorological Institute of Belgium / Royal Academy of Overseas Sciences*, 212-227.
- Ozer, P., (2000)** : Les lithométéores en région sahélienne. *GEO-ECO-TROP.*, **24**: 1-317.
- Ozer, P., (2002)** : Les lithométéores au Niger : mise au point. *Würzburger Geographische Arbeiten*, **97**: 7-32.
- Ozer, P., (2004)** : Bois de feu et déboisement au Sahel : mise au point. *Sécheresse*, **15** (3) : 243-251.
- Ozer, P., (2005)** : La désertification, cancer environnemental du Sud, *La libre Belgique du lundi 20 juin 2005*, page 20.
- Ozer, P., (2009)** : Communication personnelle.
- Ozer, P., Bodart, C., and Tychon, B., (2005)** : Analyse climatique de la région de Gouré, Niger oriental : récentes modifications et impacts environnementaux. *Cybergeo : Revue européenne de géographie*, **308**: 1-24.
- Ozer, P. and Erpicum, M., (1995)** : Méthodologie pour une meilleure représentation spatio-temporelle des fluctuations pluviométriques observées au Niger depuis 1905. *Sécheresse*, **6**: 103-108.
- PASAM, (2008)** : Rapport annuel d'activités techniques N°2, Projet d'Appui à la Sécurité Alimentaire des Ménages, PASAM-ONG Karkara-AVSF, Février 2009.
- Pasiecznik, N. M., Felker, P., Harris, P. J. C., Harsh, L. N., Cruz, G., Tewari, J. C., Cadoret, K., Maldonado, L. J., (2001)**. The *Prosopis juliflora* – *Prosopis pallida* Complex: A monograph, *HDRA, Coventry, UK*. 162 pp.
- Perumal, J. V. and Maun, M. A., (1999)**: The role of mycorrhizal fungi in growth enhancement of dune plants following burial in sand. *Functional Ecology*, **13** (4) : 560-566.
- PGRN, (1997)**: Etude monographique de l'Arrondissement de Gouré. Document interne Projet de Gestion des Ressources Naturelles de Gouré (PGRN-Gouré). 86 pp.
- Philips, J. M. and Hayman, D. S., (1970)**: Improved procedure for clearing roots and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection. *Trans. Br. Mycol. Soc*, **55**: 158-161.
- Piersotte, C., (2005)** : La lutte contre la désertification : De la convention des Nations Unies aux activités des Organisations Non-Gouvernementales belges dans la région du Sahel. Cas du Burkina Faso et du Niger. Mémoire de DESS, Université Libre de Bruxelles, Bruxelles, Belgique. 123 pp.

- Plenchette, C., (1991)** : Utilisation des mycorhizées en agriculture et horticulture. *In* Strullu, D. G., Garbaye, J., Perrin, P., Plenchette, C. (ed.), *Les mycorhizes des arbres et plantes cultivées*. Paris: Lavoisier, 131-196.
- Plenchette, C., Bois, J-F., Duponnois, R. and Cadet, P., (2000)**: La mycorhization (*Glomus aggregatum*) du mil (*Pennisetum glaucum*). *Etudes et Gestion des Sols*, Numéro spécial, **7(4)**: 379-383
- Plenchette, C., Perrin, R., and Duvert, P., (1989)**: The concept of soil infectivity and a method for its determination as applied to Endomycorrhizas. *Can. J. Bot.*, **67**: 112-115.
- PNUD, (2007)** : Rapport Mondial sur le Développement Humain 2007/2008. La lutte contre le changement climatique : Un impératif de solidarité humaine dans un monde divisé. Programme des Nations Unies pour le Développement (PNUD). Paris : Ed. *La découverte*.
- Pontanier, R., Diouf, M., and Zaafouri, M. S., (2003)** : Ecologie et régime hydrique de deux formations à *Acacia raddiana* au Nord et au Sud du Sahara (Tunisie, Sénégal). *In* Grouzis, M. and Floc'H, L. (eds.), *Un arbre au désert, Acacia raddiana*. Paris : *IRD Editions*, 79-101.
- Prasad, R., (1991)**: “Sylviculture and utilisation. Use of Acacias in wastelands reforestation”. *In: Proceedings of Advances in tropical Acacia research*, Bangkok, Tailand, John, W. Thurnbule: 96-102.
- Rapports annuels d’activités de la Direction de l’environnement de Zinder (République du Niger) de 1985 à 2008 consultés.**
- Redell, P. and Warren, R., (1986)**: Inoculation of *Acacias* with mycorrhizal fungi: potential benefits. *In* Turnbull, J. W. (ed.), *Australian acacias in developing countries: ACIAR N°16*, 50-53.
- Roose, E., (1994)** : Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols. *FAO N° 70*.
- RGP 1977** : Recensement Général de la Population, INS
- RGP 1988** : Recensement Général de la Population, INS
- RGP/H 2001** : Recensement Général de la Population et de l’Habitat, INS
- SAA/Gouré, (2000)** : Inventaire et utilisations agro-pastorales des cuvettes de l’arrondissement de Gouré, Service d’Arrondissement de l’Agriculture de Gouré, République du Niger, 21 pp.

- SAA/Gouré, (2002)** : Les pratiques agricoles dans l'Arrondissement de Gouré, Service d'Arrondissement de l'Agriculture de Gouré, République du Niger-PGRN, 46 pp.
- SDP/Gouré, (2007)** : Projections démographiques du département de Gouré, Fiche technique, Service Départemental du Plan de Gouré, République du Niger.
- SE/SDR, (2006)** : Plan d'Action : Le secteur rural, principal moteur de la croissance économique, Secrétariat exécutif de la Stratégie de Développement Rural, République du Niger, 159 pp.
- Schenck, N. C. and Pérez, Y., (1987)**: Manual for the identification of VA mycorrhizal fungi. 1st ed: INVAM, *University of Florida*, Gainesville, 245 pp.
- Schenck, N. C. and Pérez, Y., (1990)**: Manual for the identification of VA mycorrhizal fungi. 3rd ed. Gainesville : *Synergistic Publisher*.
- Sissoko, M., (2006)** : Rapport sur l'expérience du Mali en matière de lutte contre l'ensablement. Ministère de l'Équipement et des Transports, République du Mali. 8 pp
- Sieverding, E., (1991)**: Vesicular-arbuscular mycorrhizal. Management in Tropical Agrosystems, GTZ, Eschborn, N°224: 371p.
- Skidmore, E. L. and Hagen, J. L., (1977)**: Reducing wind erosion with barriers. *trans. ASAE*, **20**: 911-915.
- Smith, S. E. and Read, D. J., (1997)**: Mycorrhizal symbiosis. San Diego and London: CA : Academic Press, 605 pp.
- Sougoufara, B., (1986)** : Amélioration de la fixation des dunes du littoral par le reboisement avec *Casuarina equisetifolia* ; Séminaires sur les arbres fixateurs d'azote (A), sur la biologie des sols (B) organisés par C.R.D.I.- N.P.T.A. – I.F.S. – *ORSTOM* du 17-25 mars 1986, Dakar, Sénégal.
- Strullu, D. G., (1991)** : Mycorrhizes et développement des plantes. In Strullu, D. G., Garbaye, J., Perrin, P., and Planchette, C. (eds.), *Les mycorrhizes des arbres et plantes cultivées*. Paris: *Lavoisier*, 51-91.
- Sylvia, D. M., and Williams, S. E., (1992)**: Vesicular-arbuscular mycorrhizae and environmental stress. In. *Mycorrhizae in Sustainable Agriculture*. Bethlenfalvay, G. J., and Linderman, R. G., Eds, USA, Special Publication N° 54, Madison Wisconsin, 101-124.
- Subramanian, K. S., and Charest, C., (1997)**: Nutritional, growth, and reproductive responses of maize (*Zea mays* L.) to vesicular mycorrhizal inoculation during and after stress at tasseling. *Mycorrhiza*, **7**: 23-25.

- Subramanian, K. S., Charest, C., Dwyer, L. M., and Hamilton, R. I. (1995):** Arbuscular mycorrhiza sand water relations in maize under drought stress at tesseling. *New Phytol*, **129**: 643-650.
- Taïeb, J., (1976) :** Étude des reboisements réalisés dans la subdivision forestière d'El Feidja. *Sl : Sn*.
- Thomas, D. S. G. and Middleton, N. J., (1994):** Desertification: Exploding the Myth. *Wiley, Chichester*: 194p.
- Thomson, B. D., Grove, T. S., Malajczuk, N., and Hardy, G., (1994):** The effectiveness of ectomycorrhizal fungi in increasing the growth of *Ecalyptus globulus* Labill in relation to root colonization and hyphal development in soil. *New Phytol*, **126**: 517-524.
- Tidjani, A. A., (2006) :** Apports de la télédétection dans l'étude de la dynamique environnementale de la région de Tchago (nord-ouest de Gouré, Niger). Mémoire de DEA, Université de Liège, Belgique. 88 pp.
- Tidjani, A. D., (2008) :** Erosion éolienne dans le Damagaram Est (Sud-Est du Niger) : Paramétrisation, quantification et moyens de lutte. Thèse de doctorat, Université catholique de Louvain, Louvain-La-Neuve. 169 pp.
- Tommerup, (1992):** Methods for the study of the population biology of vascular-arbuscular mycorrhizal fungi. In Norris, J. R., Read, D. J., and Varma, A. K. (eds.), *Methods in Microbiology, Techniques for the Study of Mycorrhiza*. London: *Academy Press*, **24**: 23-51.
- Tychon, B., Biolders, C., Ozer, A., Paul, R., Ozer, P., (2001) :** Document préparatoire du PIC Gouré- Niger : *Envahissement des cuvettes par apports éoliens : processus, impacts et moyens de lutte*, 23 pp.
- UNEP, (2002):** Success stories in the struggle against desertification: A holistic and integrated approach to environmental conservation and sustainable livelihoods. Vol. 1 – Case studies: Evaluation reports, *United Nations Environment Programme (UNEP)*, 115 pp.
- Van Aarde, R. J., Ferreira, S. M., Kritzing, J. J., Van Dyk, P. J., Vogt, M., and Wassenaar, T. D., (1996):** An evaluation of habitat rehabilitation on coastal dune forests in northern KwaZulu-Natal, South Africa. *Restor Ecol*, **4**: 334-345.
- Vassal, J., (2003):** Introduction In Grouzis, M. and Floc'H, L. (eds.), *Un arbre au désert, Acacia raddiana*. Paris: *IRD Editions*, 13-17.
- Vézina, A., (2001) :** Les haies brise-vent. *Ordre des ingénieurs forestiers du Québec*, Institut de technologie agricole de La Pocatière, Cours N° 19, Formation continue: 18p.

- Von Maydell, H. J., (1983) :** *Arbres et arbustes du Sahel. Leurs caractéristiques et leurs utilisations.* Eschborn: *Schriftenreihe der GTZ* N° 147, 531 pp.
- Walker, C., (1992):** Systematics and taxonomy of the arbuscular mycorrhizal fungi. *Agronomie*, **12**: 887-897.
- World Weather Information Service, World Meteorological Organization, (2006):**
www.worldweather.org
- Zabeirou, T., (1996) :** Expérience du Niger en matière de lutte contre l'ensablement, *Actes du Séminaire- Atelier La lute contre l'ensablement et pour la stabilisation des dunes*, Rabat : *ISESCO*, 111- 136.



Annexe I : Principaux projets de fixation des dunes dans le département de Gouré

PROJET ou PROGRAMME	PERIODE	SOURCES DE FINANCEMENT	SUPERFICIE DE FIXATION DE DUNES (ha)
Projet Forestier IDA	1979 - 1990	Banque Mondiale	Non spécifiée mais incluse dans le total
Projet Energie II	1989 - 1998	Banque Mondiale	Non spécifiée mais incluse dans le total
Projet de lutte contre l'ensablement des terres des cultures dans les départements de Zinder et Diffa (NER/84/004)	1991 - 1993	FAO/PNUD	289,72
Projet AFRICARE	1994 - 1998	USAID	Non spécifiée mais incluse dans le total
PGRN (Projet de Gestion des Ressources Naturelles)	1996 – 2001	Banque Mondiale	672,24
Projet Acacia	2001-2005	FAO	Non spécifiée mais incluse dans le total
Programme Gommier	2001 - 2005	Etat du Niger	331,5
Projet Care International	2000 - 2001	Care International	Non spécifiée mais incluse dans le total
PAC (Programme d'Actions communautaire)	2003 - 2007	BAD	Non spécifiée mais incluse dans le total
Projet Danois	1998 – 2003	Danemark	Non spécifiée mais incluse dans le total
REC (Recherche Ensablement Cuvettes)	2003 – 2007	CUD – Belgique	2
PS/PR (Programme Spécial du Président de la République)	2006 – 2009	Etat du Niger	674,5
PASAM (Projet d'Appui à la Sécurité Alimentaire des Ménages)	2007 - 2009	AFD	669
PLECO (Projet de Lutte contre l'Ensablement des Cuvettes oasiennes)	2008 - 20011	FAO/PNUD	5
TOTAL			3 519,6

Annexe II : Espèces floristiques recensées dans les bandes A, B, C et Témoin en 2005, 2006 et 2007

Familles	Noms scientifiques	Bande A			Bande B			Bande C			Bande T témoin de référence		
		2005	2006	2007	2005	2006	2007	2005	2006	2007	2005	2006	2007
Poaceae	<i>Andropogon gayanus</i> var. <i>tridentatus</i> Hack.						X						X
	<i>Aristida adscensionis</i> L.		X	X	X		X		X	X	X	X	X
	<i>Aristida funiculata</i> Trim. et Rupr.		X	X	X	X	X		X	X		X	X
	<i>Aristida stipoides</i> Lam.						X						X
	<i>Aristida mutabilis</i> Trim. et Rupr.		X	X		X	X		X	X		X	X
	<i>Cenchrus biflorus</i> Roxb.		X	X	X	X	X		X	X	X	X	X
	<i>Cenchrus prieurii</i> (Kunth.) Maire.		X			X	X		X			X	X
	<i>Chloris prieurii</i> Kunth.		X		X	X	X		X			X	X
	<i>Chloris virgata</i> Sw.					X	X		X			X	X
	<i>Crotalaria arenaria</i> Benth.						X						X
	<i>Crotalaria atrorubens</i> Hochst. ex Benth.						X						X
	<i>Crotalaria macrocalyx</i> Benth.						X						X
	<i>Dactyloctenium aegyptium</i> (L.) Willd.		X	X	X	X			X	X		X	X
	<i>Digitaria gayana</i> (Kunth.) A. Chev.			X			X						X
	<i>Digitaria horizontalis</i> Willd.			X			X			X			X
	<i>Echinochloa colona</i> (L.) Link.				X								X
	<i>Eragrostis pilosa</i> (L.) P. Beauv.		X		X	X			X			X	X
	<i>Eragrostis tremula</i> Steud.		X		X	X	X		X		X	X	X
	<i>Eragrostis atrovirens</i> (Desf.) Steud.						X						X
	<i>Hyparrhenia dissolata</i> (Ness. ex Steud) W. O. Clayton						X						X
	<i>Psammophiles saheliens</i> Benth.		X	X		X	X			X		X	X
	<i>Pupalia lappacea</i> (L.) Juss.			X			X					X	X
	<i>Schiwachyrium exile</i> (Hochst.) Pilger.						X						X
	<i>Schoenefeldia gracilis</i> Kunth.			X			X			X		X	X
	<i>Sporobolus festivus</i> Hochst. ex A. Rich.												X
	<i>Tripogon minimus</i> (A. Rich.) Hochst. ex Steud.			X			X						X
	<i>Vetiveria nigriflora</i> (Benth.) Stapf.		X			X	X		X			X	X
	Papilionaceae	<i>Alysicarpus ovalifolius</i> (Shum. Et Thonn.) J. Léonard.		X		X	X	X		X		X	X
<i>Indigofera astragalina</i> DC.						X							X
<i>Indigofera microcarpa</i> Desv.			X		X	X	X				X	X	X
<i>Indigofera secundiflora</i> Poir.						X	X		X		X	X	
<i>Tephrosia obcordata</i> (Lam. ex Poir.) Baker.							X						X

Boraginaceae	<i>Cordia sinensis</i> Lam.		x			x			x			x	x
Convolvulaceae	<i>Ipomoea batatas</i> (L.) Lam.		x			x			x				x
	<i>Evolvulus alsinoides</i> (L.) L.			x		x							
	<i>Ipomoea kotschyana</i> Hochst.ex. Choisy		x			x			x				x
	<i>Ipomoea involucrata</i> P.Beauv.					x			x				x
Asclepiadaceae	<i>Leptadenia arborea</i> (Forssk.) Schweinf.					x	x		x			x	x
	<i>Leptadenia hastate</i> (Pers.) Decne.						x					x	x
	<i>Pergularia tomentosa</i> L.		x		x	x	x		x		x	x	x
Acanthaceae	<i>Barleria hochstetteri</i> Ness.						x						x
	<i>Peristrophe paniculata</i> (Forssk.) Brum mitt					x			x			x	x
	<i>Ruellia patula</i> Jacq. et Vars.						x						x
Amaranthaceae	<i>Aerva javanica</i> (Burm.) Juss.ex Schult.												x
	<i>Amaranthus graecizans</i> L.		x									x	x
	<i>Amaranthus spinosus</i> L.					x			x			x	x
	<i>Pandiaka involucrata</i> (Moq.) B.D. Jacqueson		x			x					x	x	x
	<i>Pupalia lappacea</i> (L.) Juss.												x
Cyperaceae	<i>Cyperus alopecuroides</i> Rottb.		x		x	x	x		x		x	x	x
	<i>Cyperus rotundus</i> L.						x						x
	<i>Fimbristylis cynosa</i> R.Br.		x			x			x			x	
Rosaceae	<i>Neurada procumbens</i> L.		x	x		x	x		x	x		x	x
Commelinaceae	<i>Commelina benghalensis</i> L.		x			x	x		x		x	x	x
	<i>Commelina forskoalaei</i> Vahl.		x			x	x		x			x	x
Capparidaceae	<i>Capparis decidua</i> (Forsk.) Edgew.						x					x	x
Tiliaceae	<i>Corchorus tridens</i> L.		x	x		x	x		x			x	x
Combretaceae	<i>Triumfetta pendandra</i> A. Rich.						x						x
	<i>Combretum micranthum</i> G. Don		x		x		x					x	x
Cucurbitaceae	<i>Citrillus colocynthis</i> (L.) Schrad.		x			x			x	x			x
	<i>Citrillus lanatus</i> (Thunb.) Matsumara et Nakai		x		x	x	x		x	x	x		x
	<i>Coccinea grandis</i> (L.) Voigt.		x			x	x		x			x	x
	<i>Cucumis melo</i> Naud.		x		x	x	x		x	x		x	x
	<i>Mukia maderaspatana</i> (L.) Roem.				x								
Aizoaseae	<i>Trianthema postulacastrum</i> (L.) L.		x	x		x	x		x				x
Liliaceae	<i>Dipcadi viride</i> (L.) Moench.						x					x	x
Zygophyllaceae	<i>Tribulus terrestris</i> L.		x			x	x		x			x	x
Menispermaceae	<i>Tinospora bakis</i> (A. Rich.) Miers.						x						x

Salpiniaceae	<i>Cassia italica</i> (Mill.) F.W. Anders.		x		x	x	x						x
Molluginaceae	<i>Mollugo cerviana</i> (L.) Ser.ex DC.					x	x		x				x
Caesalpiniaceae	<i>Cassia singueana</i> Delile						x						x
	<i>Cassia obtusifolia</i> L.						x						x
Euphorbiaceae	<i>Chrozophora</i> <i>brocchiana</i> Vis.		x			x	x						x
	<i>Euphorbia forskaii</i> J. Gay.		x			x	x				x		x
	<i>Ricinus communis</i> L.						x						x
Cyperadeae	<i>Cyperus rotundus</i> L.						x		x	x			x
	<i>Fimbristylis Cymosa</i> R. Br.						x		x	x			x
Polygalaceae	<i>Polygala erioptera</i> DC.			x									
Pedaliaceae	<i>Sesamum alatum</i> Thon.				x								
Total		0	35	16	18	40	58	0	35	15	11	42	71

NB : La lettre 'x' exprime la présence l'espèce florale dans la bande.

Annexe III : Evolution de la composition floristique le long de la saison pluvieuse 2006 au sein du dispositif anti-érosif

Familles	Noms scientifiques	Dates des relevés (en 2006)				
		17 juillet	24 juillet	7 août	17 août	28 août
Poaceae	<i>Aristida adscensionis</i> L.	x	x	x	x	x
	<i>Aristida funiculata</i> Trim. et Rupr.			x	x	x
	<i>Aristida mutabilis</i> Trim. et Rupr.			x	x	x
	<i>Cenchrus biflorus</i> Roxb.	x	x	x	x	x
	<i>Cenchrus prieurii</i> (Kunth.) Maire.	x	x	x	x	x
	<i>Chloris prieurii</i> Kunth.	x	x	x	x	x
	<i>Chloris virgata</i> Sw.	x	x	x	x	x
	<i>Dactyloctenium aegyptium</i> (L.) Willd.		x	x	x	x
	<i>Eragrostis pilosa</i> (L.) P. Beauv.			x		
	<i>Eragrostis tremula</i> Steud.	x	x		x	x
	<i>Psammophiles sahelienis</i> Benth.		x	x	x	x
	<i>Vetiveria nigriflora</i> (Benth.) Stapf.	x	x	x	x	x
Papilionaceae	<i>Alysicarpus ovalifolius</i> (Shum. et Thonn.) J. Léonard.		x	x	x	x
	<i>Indigofera microcarpa</i> Desv.	x	x	x	x	x
	<i>Indigofera secundiflora</i> Poir.					x
Boraginaceae	<i>Cordia sinensis</i> Lam.		x	x	x	x
Convolvulaceae	<i>Evolvulus alsinoides</i> (L.) L.	x				x
	<i>Ipomoea batatas</i> (L.) Lam.		x	x	x	x
	<i>Ipomoea kotschyana</i> Hochst.ex.Choisy			x	x	x
	<i>Ipomoea involucrata</i> P. Beauv.		x	x	x	x
Asclepiadaceae	<i>Leptadenia arborea</i> (Forssk.) Schweinf.			x	x	x
	<i>Leptadenia hastata</i> (Pers.) Decne.		x			x
	<i>Pergularia tomentosa</i> L.			x	x	x
Acanthaceae	<i>Peristrophe paniculata</i> (Forssk.) Brum. mitt					x
Amaranthaceae	<i>Amaranthus graecizans</i> L.			x	x	x
	<i>Amaranthus spinosus</i> L.	x				
	<i>Pandiaka involucrata</i> (Moq.) B.D. Jacqueson	x		x	x	x
Cyperaceae	<i>Cyperus rotundus</i> L.		x	x	x	x
	<i>Fimbristylis cynosa</i> R. Br.	x	x	x	x	x
Rosaceae	<i>Neurada procumbens</i> L.			x	x	x
Commelinaceae	<i>Commelina benghalensis</i> L.		x	x	x	x
	<i>Commelina forskalaei</i> Vahl.		x	x	x	x
Tiliaceae	<i>Corchorus tridens</i> L.				x	x

Combretaceae	<i>Combretum micranthum</i> G. Don			x	x	x
Cucurbitaceae	<i>Citrillus colocynthis</i> (L.) Schrad.	x	x	x	x	x
	<i>Citrillus lanatus</i> (Thunb.) Matsumara et Nakai		x	x	x	x
	<i>Coccinea grandis</i> (L.) Voigt.	x	x	x	x	x
	<i>Cucumis melo</i> Naud.	x	x		x	x
Aizoaceae	<i>Trianthena postulacastrum</i> (L.) L.	x	x	x	x	x
Zygophyllaceae	<i>Tribulus terrestris</i> L.	x	x	x	x	x
Salpiniaceae	<i>Cassia italica</i> (Mill.) F.W. Anders.	x			x	x
Molluginaceae	<i>Mollugo cerviana</i> (L.) Ser.ex DC.					x
Euphorbiaceae	<i>Chrozophora brocchiana</i> Vis.	x			x	x
	<i>Euphorbia forskaii</i> J. Gay.		x	x	x	x
Polygalaceae	<i>Polygala erioptera</i> DC.	x				x
Total		20	26	33	37	40

NB : La lettre 'x' exprime la présence l'espèce florale au sein des claires à la date du relevé.