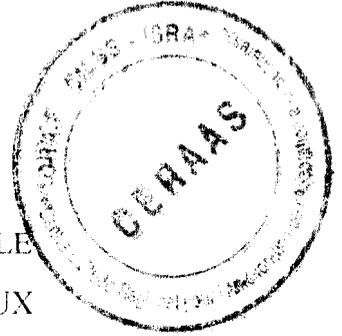


CR001114



MINISTÈRE DE L'ÉDUCATION NATIONALE
ÉCOLE NATIONALE DES CADRES RURAUX
DÉPARTEMENT : PRODUCTIONS VÉGÉTALES

∴

MEMOIRE PRESENTE ET SOUTENU POUR L'OBTENTION DU
DIPLOME D'INGENIEUR DES TRAVAUX AGRICOL-ES

**INFLUENCE DES LÉGUMINEUSES ARBOREES
PERENNES SUR L'ALIMENTATION EN EAU, LA
NUTRITION AZOTEË ET LA PRODUCTIVITE DU
M J L (*Pennisetum glaucum* R. Leeke cv. *SOUNA 3*) EN
ZONE SEMI-ARIDE DU SENEGAL**

PAR

M. Ibrahima SENE

Maître de stage

M. Babacar FAYE
Formateur, ENCR

Tuteurs de stage

M. Macoumba DIOUF, Chercheur/CERAAS
M. Jean-Luc CHOTTE, Chercheur/ORSTOM

DECEMBRE 1998

DEDICACES.. . . .

A ma mère Amy TOURE.

A mon père Moussa SENE .

A mes frères et sœurs particulièrement à mon grand frère Mawa SENE

A mes oncles et tantes, particulièrement Fatou SENE et Ibra TOURE.

4 mes cousins et cousines, particulièrement à Ibou DIOUF.

AVANT – PROPOS

Ce travail est un fruit d'une collaboration entre l'Ecole Nationale des Cadres Ruraux (ENCR), le Centre d'Etude Régional de l'Amélioration de l'Adaptation à la Sécheresse (CERAAS) et l'Institut Français de Recherche pour le Développement en Coopération (ORSTOM).

Nous tenons à remercier tous ceux qui ont contribué à son aboutissement

Toutefois, qu'il nous soit permis d'adresser nos sincères remerciements

- à notre directeur d'école Mr Sidy Haïrou CAMARA.
- à notre directeur des études Mr Babacar NDAW.
- à notre chef de département Mr Cheikh Mbacké MBOUP
- à notre maître de stage M. Babacar FAYE
- au directeur du CERAAS Mr H. ROY-MACAULEY d'avoir autorisé notre accueil au centre.
- à notre tuteur de stage, le Docteur Macoumba DIOUF, chercheur au CERAAS Nous tenons vraiment à vous remercier d'avoir guider nos premiers pas dans le monde de la recherche. Nous vous témoignons toute notre reconnaissance pour nous avoir encadré avec rigueur et compétence. Vous n'avez ménagé aucun effort pour que notre stage se déroule dans de bonnes conditions. Nous tenons à vous remercier vivement pour les conseils que vous nous avez apportés. Sagesse, rigueur scientifique, et organisation dans le travail ont été les meilleures qualités que nous garderons de vous.
- à notre tuteur de stage le Docteur J.-L. CHOTTE, responsable du laboratoire de Bio-Pédologie de l'ORSTOM pour l'accueil, les moyens que vous nous avez assurés au sein de votre laboratoire, et la confiance que vous nous avez accordée en nous donnant ce travail.
- au Dr Baba NDOUR, chercheur au CNBA, pour avoir mis en place le dispositif agroforestier qui a abrité cette étude, et avoir été w-initiateur de ce travail.
- à nos professeurs de l'Ecole Nationale des Cadres Ruraux de Bambey.
- à Mr Gassama, responsable du volet agroforesterie du Projet Agroforestier de Diourbel (FIDA), pour avoir collaboré dans la conduite de cet essai.
- à nos professeurs de l'Ecole Nationale des Cadres Ruraux de Bambey.
- au Dr Benoît SARR chercheur au CERAAS d'avoir participer à l'élaboration de ce document.
- à Mr Omar DIOUF, chercheur au CERAAS pour l'aide qu'il nous a apportée durant notre formation.
- à Mr Sidy SIDIBE chef du service d'exploitation du CERAAS et à tous ses collaborateurs (techniciens et ouvriers agricoles) : Pape NDIAYE, Cheikh SENE, Abdou FAYE et

Ibrahima NDONG, Amadou DIOP et Ibrahima SANE pour leur parfaite collaboration sur le terrain.

• a tout le personnel du CERAAS. particulièrement à Couna SYLLA qui a beaucoup contribué à notre formation en informatique.

• a Monsieur J FARDOUX technicien au laboratoire de Bio-Pédologie pour sa disponibilité dans notre formation sur les techniques d'analyses de laboratoire.

• a Monsieur Omar FAYE technicien et ses collaborateurs, MAYECOR. SANE, R.4 et TRAORE pour l'appui qu'ils nous ont apporté dans la réalisation de l'analyse des échantillons de soi

• aux bibliothécaires du CNBA. Mlles Rosalie et du CERAAS, Fatoumata DIALLO pour l'aide qu'elles nous ont apportée dans la recherche bibliographique.

• au stagiaire Djibril SARR étudiant en 5^{ème} année pour l'accueil chaleur qu'il nous a accordé au sein de l'ENSA et sa parfaite collaboration dans le cadre de ce travail. A travers lui nous tenons à remercier tous les étudiants et le personnel de la cuisine de l'ENSA.

• a Monsieur Makhfous SARR pour l'accueil que vous nous avez réservé à Niary Gally Nous ne regrettons pas d'avoir rencontré un homme aussi sage que vous. A travers vous nous tenons à remercier vos voisins, SEYNABOU et LAYE.

• au stagiaire belge, Valérie pour sa parfaite collaboration dans le cadre de ce travail.

Nos remerciements les plus chaleureux sont aussi destinés :

• aux stagiaires du laboratoire Bio-Pédologie, et particulièrement à Ndèye NDIAYE, Ndeye Yacine BADIANE, EMMANUELLE, 'pour l'aide que vous nous avez apportée.

• à Mr Mbissane NDIAYE chef de village de Fintel Somb, pour nous avoir donné son champ et avoir fructueusement collaboré. A travers lui, nous tenons à remercier toute sa famille et particulièrement son neveu Mor DIENG pour le soutien qu'il nous a apporté pour la lecture des données pluviométriques.

• à Maimouna DIOUF et son époux pour l'accueil chaleur qu'ils nous ont réservé au CNBA

• à tous les membres du Dahira des Etudiants Elèves et Travailleurs Tidiane de Fass pour leur accueil chaleur, et particulièrement à Malick MBODJI.

Nous exprimons notre sincère reconnaissance aussi :

• à tous nos camarades de la 33^{ème} promotion, aux étudiants de la 34^{ème} et 35^{ème}

• à nos frères Mbaye, Ali, Malick, Modou et sœurs Ndèye, Thiénaba

• à nos cousins Pierre, Laye, Assane, et cousines Adjji, Marne coumba, Kiné

• à nos amis Meissa, Ibou, Mansour, Omar, Makha, Pape, Matar

• a notre frère Thierno FALL pour les conseils que vous nous avez apportés,

Nom SENE

Prénom : Ibranima

Titre : Influence des légumineuses arborées pérennes sur l'alimentation en eau, la nutrition azotée et la productivité du mil (*Pennisetum glaucum* R. Leeke cv. Souna 3) en zone semi-aride du Sénégal.

RESUME

L'agroforesterie est un système d'utilisation des terres reposant sur l'association des arbres avec les cultures qui pourrait constituer une solution d'amélioration de la production agricole dans les zones semi-arides caractérisées par une réduction des espaces agricoles, et une augmentation de la population. Cependant, la réussite d'une telle association dépendra des processus de partage des ressources hydriques et minérales entre les deux strates.

Afin de contribuer à une meilleure compréhension de ces relations, il a été conduit à Diourbel une étude portant sur l'association de deux légumineuses caractéristiques du Sahel (*Acacia raddiana* et *Acacia senegal*) avec le mil (*Pennisetum glaucum* R. Leeke cv. Souna 3) principale céréale cultivée et aliment de base pour les populations des zones semi-arides.

L'objectif de cette étude est d'appréhender la dynamique de l'eau et de l'azote dans le sol afin de comprendre le processus de partage entre les ligneux et le mil, de caractériser le comportement agromorphologique du mil sous l'effet des ligneux, et d'évaluer la biomasse microbienne totale et la teneur en azote minéral.

L'étude bibliographique a permis de donner une description des caractéristiques des espèces étudiées, et dresser une synthèse sur l'état actuel des connaissances sur l'association arbres/cultures.

Les résultats obtenus sur la biomasse microbienne totale, le bilan hydrique, la consommation en eau, le développement de la culture par conséquent la production de la culture révèlent l'effet améliorateur des légumineuses arborées pérennes (*A. raddiana* et *A. senegal*), ceci à travers :

- la nutrition hydrique liée à une bonne capacité d'absorption de la culture grâce à des conditions environnementales favorables, une meilleure disponibilité et une modification de la dynamique de l'eau ;
- la quantité importante de biomasse microbienne soit 2,6 fois plus importante sous couvert *A. raddiana* que hors couvert dans la parcelle témoin, et 2,5 fois sous *A. senegal* ; ce qui traduit une forte activité des micro-organismes du sol sous le couvert des acacias ;
- la bonne croissance et le bon développement de la culture, et par conséquent la meilleure production sous acacias (qui est 2,3 fois plus importante sous *Acacia raddiana* et 1,1 fois sous *Acacia senegal*) que hors couvert.

Ainsi, il apparaît que les meilleures performances ont été enregistrées avec *A. raddiana* par rapport à *A. senegal*. Ces travaux devraient être poursuivis d'une part, dans le cadre d'essais multi-sites avec des populations adultes, et d'autre part avec le suivi des réponses physiologiques des plantes au cours du cycle cultural.

Mots-clés : eau, azote, productivité, *Acacia tortilis* (Forssk.) Hayne subsp *raddiana* (Savi) Brenan, *Acacia senegal* (L.) Willd. , *Pennisetum glaucum* R. Leeke cv Souna 3

Name : Ibrahima SENE

Title : The influence of leguminous trees on water consumption, nitrogen nutrition and productivity of millet (*Pennisetum glaucum* R. Leeke cv. Souna 3) in the semi-arid zone of Senegal

Abstract

Agroforestry, a system of land utilization based on the association of trees and crops, constitutes one of the ways of improving agricultural production in the semi-arid zones characterized by reduced agricultural land and rapid population increase

However, the success of such an association depends on the way in which water and mineral resources are shared between the two plant layers. It is on this basis that this study was conducted at Diourbel on the association of two leguminous trees characteristic of the Sahel (*Acacia raddiana* and *Acacia senegal*) and millet (*Pennisetum glaucum*), a major staple food crop of the semi-arid population.

The objectives of this study therefore, were to understand the water and mineral nitrogen dynamics of the soil in order to determine how they are shared between the trees and the crop, characterise the agromorphological behaviour of millet under the woody plants, evaluate the total microbial biomass and the nitrogen mineral content of the soil

The characteristics of the species studied and a synthesis of the state of knowledge on the association of leguminous trees and crops have been made on the basis of review of literature

The results obtained on water balance, total microbial biomass, crop development and consequently the productivity revealed the ameliorating effects of the leguminous trees (*Acacia raddiana* and *Acacia senegal*) as follows :

- water consumption was linked to a better absorption capacity of the plants growing under favourable environmental conditions, better available and modification of the soil water dynamics ;
- the high microbial biomass, namely 2.6 times higher under *Acacia raddiana* cover, and 2.5 times higher under *Acacia senegal* than the control (outside the cover) is an indication of high microbial activities in the soil under the acacia trees ;
- better growth and development and consequently productivity under the acacia trees (that is 2.3 times higher under *A. raddiana* and 1.1 times higher under *A. senegal* than the control).

Thus, it is apparent that a better performance was obtained with *A. raddiana* in relation with *A. senegal*. Further studies are required on multi-locational sites with other species, mature trees populations, different types of soil, and on the physiological responses of the trees in the course of the development of the crops.

Keywords : water, nitrogen, productivity, *Acacia tortilis* (Forssk.) Hayne subsp. *raddiana* (Savi) Brenan, *Acacia senegal* (L.) Willd., *Pennisetum glaucum* R. Leeke cv. Souna 3

TABLE DES MATIERES

1. ETAT DES CONNAISSANCES	2
1.1. Position taxonomique et caractéristiques des espèces étudiées ..	2
1.1.1. Les légumineuses arborées pérennes : <i>Acacia raddiana</i> et <i>Acacia senegal</i>	2
1.1.1.1. <i>Acacia tortilis</i> (Forssk) Hayne <i>subsp raddiana</i> (Savi) Brenan	2
1.1.1.2. <i>Acacia senegal</i> (L . .) Willd	3
1.1.2. Pennisetum glaucum	4
1.2. Acquis de la recherche agroforestière..	5
1.2.1. Arbre et alimentation en eau des cultures annuelles.	6
1.2.2. Arbre et nutrition azotée des cultures annuelles.	7
1.2.3. Arbre et productivité des cultures.. .. .	7
2, MATERIEL ET METHODES	8
2.1. Site expérimental	8
2.2. Matériel végétal	10
2.3. Dispositif expérimental	10
2.4. M é t h o d e	11
2.4.1. Conduite de la culture	11
2.4.2. Paramètres étudiés et méthodes de mesure ..	11
2.4.2.1. Suivi des paramètres climatiques.. .. .	11
2.4.2.2. Suivi du bilan hydrique du sol	11
2.4.2.2.1. Equation du bilan hydrique	11
2.4.2.2.2. Principe de la méthode neutronique.. ..	12
2.4.2.2.3. Etalonnage.. .. .	12
2.4.2.2.4. Protocole de mesure.. .. .	13
2.4.2.3. Suivi de la biomasse microbienne et de l'azote minéral du sol	13
2.3.2.3.1. Echantillonnage	13
2.3.2.3.2. Suivi de la biomasse microbienne totale... ..	14
2.3.2.3.3. Suivi de l'azote minéral du sol	14
2.4.2.3.3.1. Dosage de l'azote ammoniacal (N-NH ₄).. ..	14
2.4.2.3.3.2. Dosage de l'azote nitritique (N-NO ₂).. .. .	14
2.4.2.4. Observations phénologiques et mesures agronomiques	14
2.4.2.4.1. Observations phénologiques.. .. .	14
2.4.2.4.1.1. Phénologie du mil	14
2.4.2.4.1.2. Phénologie des ligneux	14
2.4.2.4.2. Suivi de la croissance et du développement de la culture. ..	15
2.4.2.4.3. Le rendement et ses composantes,	16
2.4.2.5. Méthodes d'analyse	16
3. RESULTATS ET DISCUSSION	16
3.1. Résultats.	16
3.1.1. Caractéristiques micro-climatiques du site d'étude.. ..	16
3.1.2. Bilan hydrique sous et hors du houppier.	17
3.1.2.1. Profils hydriques sous et hors couvert.	17
3.1.2.2. Analyse de la consommation hydrique (ETR) sous et hors couvert	19
3.1.3. Nutrition azotée	20
3.1.3.1. Biomasse microbienne totale.. .. .	20
3.1.3.2. Azote minéral	22
3.1.4. Mesures agronomiques	22
3.1.4.1. Observations phénologiques.. .. .	23
3.1.4.1.1. Phenologie des ligneux	22

3.1.4.1.2	Comportement agromorphologique de la culture sous et hors couvert des ligneux	23
3.1.4.1.2.1	Hauteur du brin-maitre.. .. .	23
3.1.4.1.2.2	Nombre de feuilles.	24
3.1.4.1.2.3	Nombre d'épis	25
3.1.4.1.2.4	Evolution de l'indice foliaire ou LAI (Leaf Area Index) au cours du développement de la culture sous et hors couvert ...	27
3.1.4.2	Effet des légumineuses sur le rendement et ses composantes	27
3.1.4.2.1	Poids sec total des épis... .. .	28
3.1.4.2.2	Matière sèche totale	28
3.1.4.2.3	Nombre de grains par mètre carré ..	29
3.1.4.2.4	Poids de 1000 grains	20
3.1.4.2.5	Rendement en grain et en paille.	29
3.1.4.2.6	Corrélation entre le rendement et ses composantes.,	31
3.1.4.2.7	Efficacité d'utilisation de l'eau.. .. .	32
3.2.	Discussion générale .	33

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Répartition interannuelle de la pluviométrie dans la région de Diourbel	9
Figure 2 : Répartition interannuelle de la pluviométrie mensuelle dans la région de Diourbel	9
Figure 3 : Droite d'étalonnage de l'appareil Troxler.	13
Figure 4 : Répartition décadaire de la pluviométrie au cours de la période d'étude	17
Figure 5 : Profils hydriques sous et hors couvert des arbres	19
Figure 6 : Evolution de la biomasse microbienne sous et hors couvert arboré	21
Figure 7 : Evolution de la biomasse microbienne sous et hors couvert arboré	22
Figure 8 : Spectre phénologique de <i>Acacia raddiana</i> et <i>Acacia senegal</i> .	23
Figure 9 : Evolution de la hauteur du brin-maître au cours du cycle suivant le transect sous-hors couvert chez <i>A. raddiana</i> et <i>A. senegal</i> .	23
Figure 10 : Evolution du nombre de feuilles (NBREF) au cours du cycle suivant un transect sous-hors couvert chez <i>A. raddiana</i> et <i>A. senegal</i> .	25
Figure 11 : Evolution du nombre d'épis (NBREP) suivant un transect sous-hors couvert chez <i>Acacia raddiana</i> et <i>Acacia senegal</i> .	26
Figure 13 : Evolution de l'indice foliaire au cours du développement de la culture sous et hors couvert	27
Figure 15 : Poids de matière sous <i>A. raddiana</i> et <i>A. senegal</i> , et dans la parcelle témoin	28
Figure 16 : Nombre de grains par m ² (NGM2) et poids de 1000 grains (PMG) sous et hors couvert.	29
Figure 17 : Rendement en grain (RDTGP) et en paille (RDTP) sous couvert arboré et dans les placettes témoins.	30
Figure 18 : Relation entre le rendement en grains (RDTG) et le nombre de grains par mètre carré sous et hors couvert arboré.	32
Figure 19 : Efficacité d'utilisation de l'eau sous et hors couvert arboré.	33

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I :	Quelques paramètres micro-climatiques sous et hors couvert	17
Tableau II :	Pluviométrie et consommation en eau des cultures suivant un transect sous-hors couvert chez <i>Acacia raddiana</i> et <i>Acacia senegal</i> .	20
Tableau III :	Rendement et ses composantes pour différents niveaux d'influence des acacias	31

INTRODUCTION

La forte croissance de la population des zones semi-arides au sud du Sahara durant les dix dernières années (2 à 3 %) rend nécessaire l'accroissement de la production agricole (Dufumier, 1994). Ce besoin accru de production et la pénurie de terres cultivables ont engendré une disparition de l'agriculture itinérante, fondée sur l'alternance de temps court de mise en culture et de longues périodes de jachères (Faure, 1993). Cette disparition d'anciennes pratiques culturales a pour effet, l'exploitation des terres peu favorables aux activités agricoles et la surexploitation des espaces agricoles cultivables, et par conséquent une baisse de leur fertilité. Ce qui se traduit par une diminution de la production agricole qui a été accentuée depuis les années 1970 par la sécheresse phénomène dont personne n'est en mesure de prévoir le terme.

Face à une telle situation, il s'avère nécessaire voire capital d'adopter des stratégies propres à améliorer la fertilité des terres, et l'utilisation des ressources hydriques et minérales. Certes de nombreux résultats émanant de la recherche ont montré l'utilité des engrais minéraux et organiques même sur les sols sableux du Sahel et celle de certains travaux de sol, tels que les labours profonds, sur l'état hydrique (Aliou *et al.*, 1995) et la fertilité des sols. Mais il serait difficile de vouloir généraliser ces résultats à l'échelle des agriculteurs sahéliens dépourvus de moyens financiers, matériel et de la technicité requise. Dès lors, l'agroforesterie qui est un des moyens de lutte s'impose dans nos zones comme une alternative intéressante. Il s'agit d'une technique d'utilisation des terres reposant sur l'intégration prudente d'arbre et d'arbustes dans les systèmes de cultures et d'élevage (ICRAF, 1995).

Toutefois, le succès de cette forme d'association dépendra très étroitement des processus de partage des ressources entre les arbres et les cultures. Or, force est de constater que peu de recherches ont été consacrées aux interactions arbre/cultures même si quelques travaux portant sur l'influence de *Acacia albida* Del.: de *Butyrospermum paradoxum* (G. Don) Kotschy, et de *Parkia biglobosa* (Jacq.) Benth. sur les cultures (mil et sorgho) ont été réalisés (Charreau et Vidal, 1965 ; Jung, 1967 cité par Louppe *et al.* (1996) ; Dancette et Poulain, 1968 cités par Louppe *et al.* (1996) ; Louppe *et al.*, 1996 ; Olivier *et al.*, 1996, Maïga, 1997) Par conséquent, les recherches sur les associations arbres/cultures doivent être étendues à d'autres espèces ligneuses arborées pérennes, et particulièrement aux légumineuses qui peuvent en plus assurer la nutrition azotée partielle des cultures annuelles associées (Ganry et Dommergues, 1993). Dans ce sens, Obaton (1992) estime d'ailleurs, que les légumineuses peuvent fournir entre 0 et 90% de l'azote nécessaire à la culture.

Par ailleurs, l'accent devra être mis sur les relations entre ces deux strates (arbre et culture annuelles) pour une meilleure compréhension des mécanismes de partage des ressources hydriques et minérales (ICRAF, 1995).

C'est dans ce cadre que le Centre d'Etude Régional pour l'Amélioration de l'Adaptation à la Sécheresse (CERAAS) créé en 1989, base centre de la Conférence des Responsables de la Recherche Agronomique africaine (CORAF), et l'Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération (ORSTOM) par le biais de son laboratoire de Biopédologie, ont initié une opération de recherche dans le cadre de ce travail. Cette contribution a été faite en prélude à une proposition de recherche collaborative sur l'impact de deux espèces légumineuses arborées pérennes caractéristiques du Sahel, *Acacia tortilis* (Forssk.) Hayne *subsp raddiana* (Savi) Brenan et *Acacia senegal* (L.) Willd sur le *Pennisetum glaucum* R. Leeke.

A travers cette étude; nous nous sommes fixé comme objectifs

de caractériser le comportement agromorphologique du mil en association avec les légumineuses *Acacia tortilis* (Forssk.) Hayne subsp *raddiana* et *Acacia senegal* (L.) Willd d'étudier la dynamique de l'eau et de l'azote minéral dans le sol pour comprendre le processus de partage entre les ligneux et le mil ;

d'évaluer la biomasse microbienne totale dans le sol et d'appréhender son activité

Dans le premier chapitre de ce travail nous essayerons de faire une synthèse bibliographique sur l'état actuel des connaissances sur l'agroforesterie, et particulièrement sur les associations arbres/cultures annuelles. Le matériel et les méthodes d'étude utilisés seront présentés dans le second chapitre de ce mémoire, et le troisième chapitre donnera les résultats obtenus qui seront discutés pour aboutir à une conclusion générale et des perspectives,

1. ETAT DES CONNAISSANCES

Cette partie du mémoire constitue une synthèse bibliographique qui présente des caractéristiques de la culture de mil et des espèces ligneuses (*Acacia raddiana*, *Acacia senegal*) étudiées, et l'état des connaissances sur les associations arbres/cultures annuelles.

7.1. Position taxonomique et caractéristiques des espèces étudiées.

1.1.1. Les légumineuses arborées pérennes : *Acacia raddiana* et *Acacia senegal*

Au Sénégal, 330 espèces légumineuses ont été identifiées, réparties en 94 genres et représentent près de 16 % des 2086 taxons que compte le pays et 4 % des 858 genres présents (Diédhiou, 1993) Cette superfamille des légumineuses est divisée en trois sous-familles les Césalpiniaceae, les Fabaceae les Mimosaceae. La famille des Mimosaceae renferme des espèces dites principales (*Acacia albida*, *Acacia nilotica* var *adansoni*, *Acacia senegal*, *Acacia seyal*, *Acacia tortilis* ssp. *raddiana*, *Prosopis africana* etc.), et celles dites secondaires (*Albizia amara*, *Acacia laeta*, *Acacia millifera*, *Parkia biglobosa* etc.), (Le Houérou, 1979). Parmi celles dites principales les plus fréquentes au Sénégal sont *Acacia albida*, *Acacia raddiana*, *Acacia senegal*, *Acacia seyal*. Chacune de ces espèces présente des particularités qui la qualifie d'espèce adaptable aux conditions de pluviosité variable des zones semi-arides (Seif el Din, 1979).

1.1.1.1. *Acacia tortilis* (Forssk) Hayne subsp *raddiana* (Savi) Brenan¹

Acacia raddiana ou *seng* en wolof est une espèce très répandue dans la zone sahélienne. Elle est présente sur les deux rives du Sahara. (Fournier, 1995). Au Sénégal, elle est rencontrée sur les 2/3 du territoire (Diouf et Grouzis, 1996).

Acacia raddiana est une plante ligneuse de la famille des Mimosaceae. Elle présente un système racinaire avec un enracinement vertical (dont 3 principales zones d'absorption : 0-, 100 cm, 200 cm, et 300-350 cm) et un enracinement horizontal (jusqu'à une distance optimale de 14 m) (Diouf, 1996). C'est un arbuste caducifolié épineux qui peut atteindre 8 m à 10 m de hauteur (von Maydell, 1983 ; Fournier, 1995). Cet arbre du domaine sahélien se distingue facilement grâce à son port particulier avec une couronne arrondie ou hémisphérique. Les feuilles sont composées et présentent plusieurs paires de pinnules portant des foliolules de petites tailles. Les fleurs sont constituées de boules blanchâtres à jaune clair, large de 7 à

¹ Dans la suite du texte, le vocable *Acacia raddiana* désignera cette espèce.

10 mm Ses fruits, sous forme de gousse contenant 10 grains bruns et ovales, se reconnaissent grâce à sa forme spiralée et glabre (Diouf, 1996). Au Sénégal, *Acacia raddiana* est réparti dans l'aire comprise entre les isohyètes 300 mm et 900 mm (Diouf et Grouzis, 1996) Elle forme des peuplements clairs purs sur les sables et les sols érodés par les vents ou l'eau. On le rencontre également sur sols ferrugineux, alcalins profonds ou sur les sols limono-sableux (Diouf et Grouzis, 1996). Selon ces mêmes auteurs c'est une espèce inféodée aux bioclimats sahéliens à sahélo-soudaniens.

Comme la plupart des espèces légumineuses de la famille des Mimosacées - 87% des espèces étudiées - (Guèye, 1991), elle est capable de fixer l'azote atmosphérique par l'intermédiaire des nodules racinaires. Ces nodules sont formés par la symbiose entre les racines de l'arbre et les bactéries à croissance rapide du genre *Rhizobium*. La localisation de ces nodules racinaires est relativement superficielle, et leur zone préférentielle de formation se situe entre 50 et 75 cm pour une distance de 2 m du tronc de l'individu (Diouf, 1996).

Par ailleurs, les travaux de Dreyfus et Dommergues (1981) et de Ganry et Dommergues (1983) ont révélé que cette espèce est à faible pouvoir fixateur d'azote. Elle produit 0,22 g de nodules secs par plante pour une quantité d'azote fixé de 0,52 g par plante (Ndoye et Guèye, 1993). La capacité fixatrice de cette espèce, et d'une manière générale celle des légumineuses fixatrices d'azote, est fortement limitée par certains facteurs pédo-climatiques, notamment le déficit hydrique, l'excès de nitrates dans le sol et la carence phosphatée (Obaton, 1992).

En dehors de son rôle écologique dans les régions sahéliennes, *Acacia raddiana* joue un rôle non négligeable dans l'économie de ces zones. Il est utilisé comme bois de service pour les constructions, la fourniture de piquets ou de perche ainsi que dans la confection de clôture. Il produit un bon bois de feu et de charbon (von Maydell, 1983) Excellent fourrage d'appoint, ses feuilles et fruits sont consommés par le bétail.

1.1.1.2. *Acacia senegal* (L.) Willd

Acacia senegal est une plante ligneuse de la famille des Mimosaceae, qui est aussi un arbre caractéristique du Sahel.

Acacia senegal présente un système racinaire pivotant susceptible d'atteindre 2,75 m pour une circonférence au collet 0,37 m, avec des racines latérales de 6 à 8 m dans les 15 premiers centimètres du sol (Fournier, 1995). C'est un arbre caducifolié épineux qui peut atteindre 2 à 6 m de hauteur. De forme très désordonnée pendant les premières années, elle se transforme par la suite en un arbre au tronc droit et court avec une cime en forme de parasol et des branches très ramifiées ascendantes. Les feuilles sont composées et présentent 3 à 5 paires de pinnules ayant 10 à 20 paires de foliolules oblongues d'une largeur de 1 à 2 mm, et d'une longueur de 3 à 5 mm.

La phase feuillée s'étend en moyenne sur six mois et la défoliation a généralement lieu en novembre. C'est un arbre qui a ses fleurs, avant la saison des pluies de mai à août (Aubreville, 1950), et une seule fois en début de saison des pluies cependant une seconde floraison a été constatée en janvier-février au Ferlo (Poupon, 1980 cité par Diouf (1996)) Les fruits qui mûrissent en décembre-janvier sont des gousses oblongues, plates papyracées longues de 8 à 10 cm sur 1,5 à 1,8 cm de largeur (Giffard, 1966). Les graines sont dispersées en milieu de saison sèche (Fournier, 1995). C'est une espèce qui préfère les sols sableux, brun rouge ou ferrugineux, mais se développe également sur les sols bruns argileux. On la rencontre dans les zones où la pluviométrie est comprise entre 100 à 600 mm.

Comme *Acacia raddiana* elle est capable de fixer l'azote atmosphérique grâce à sa symbiose avec les bactéries du genre *Rhizobium* à croissance rapide (Ganry et Dommergues, 1993) formant ainsi des nodules blanchâtres de 0,5 à 2 mm (de Lajudie *et al.*, 1991). C'est une espèce à faible potentiel fixateur d'azote. Elle produit 0,01 g de nodules secs pour une quantité d'azote fixé de 0,35 g par plante (Ndoye et Guèye, 1993). Cette fixation d'azote est limitée par divers facteurs environnementaux (Ganry et Dommergues, 1993).

Elle contribue beaucoup à l'économie grâce à son exploitation pour la production de gomme arabique (sève d'or) en très grande quantité - 90 % de la production mondiale - (von Maydell, 1983). Elle produit également un bon bois de feu et fournit un fourrage non négligeable pour les animaux.

II.2. *Pennisetum glaucum*

Plante des mille grains (800 à 3000 grains/épi), le mil est originaire de l'Afrique occidentale où il est cultivé sur 12,2 millions d'hectares soit 49 % de la surface mondiale (Spencer et Sivakumar, 1987 cités par O.M.M. (1993)). Au Sénégal, le mil est la principale céréale cultivée aussi bien au niveau des surfaces emblavées, que pour la production. En 1995, elle occupait 73,47 % des surfaces cultivées en céréale avec une production totale de 666805 tonnes soit 63 % de la production céréalière totale.

Malgré la faible productivité de la culture - 300 à 600 kg/ha - (O.M.M., 1993) au Sénégal elle constitue la base de l'alimentation des populations. Il a une valeur énergétique de 3500 calories/jour, et est généralement préparé après transformation (décorticage et pétrissage), sous forme de bouillie, de plats cuits à vapeur (couscous), de pain fermenté, de boisson alcoolisée et non alcoolisée.

C'est une espèce annuelle de la famille des graminées, tribu des *Panicaceae* avec plusieurs synonymes *Pennisetum americanum*, *Pennisetum spicatum*, *Pennisetum typhoides*. Le système racinaire est fasciculé avec une seule racine séminale et de nombreuses racines adventives. Les racines peuvent atteindre 1 m de profondeur, mais la grande majorité des racines restent superficielles (Gregory & Squire, 1979 cités par O.M.M. (1993)). En ce qui concerne la densité racinaire, 82 à 85 % de la biomasse se retrouvent dans les 50 premiers centimètres du sol et seulement 50 % de la longueur totale (Bieler, 1992 cité par O.M.M. (1993)).

Le mil explore bien le sol dans l'interligne et les racines peuvent arriver à 3 m du pied. Ce système racinaire supporte un port érigé avec une hauteur maximale variant de 0,5 à 4 m selon les variétés, une tige avec des entrenœuds pleins dont les nœuds de la base sont capables de donner des talles. Sur ces nœuds s'insèrent des feuilles alternes et parallèles, formées d'une gaine complètement enveloppante et d'un limbe lancéolé glabre ou pubescent. L'inflorescence est une panicule apicale très dense, cylindrique (un diamètre variant de 0,5 à 4 cm) et long de 15 à 140 cm. Elle est constituée d'un rachis rigide portant des épillets pédonculés groupés dans des bouquets de soies plumeuses. Le fruit est un caryopse nu de forme ovoïde ou elliptique longue d'environ 4 mm et, de couleur variable. Le mil a un cycle de développement d'une durée variant de 75 à 200 jours selon les variétés et qui peut être découpé en trois phases :

une phase végétative qui s'étale de la germination à la montaison et qui dure 60 jours pour une variété de 90 (cas de la Souna 3 étudiée) ;

une phase reproductrice qui s'étale du 60^{ème} au 75^{ème} jour après semis pour cette même variété, correspondant à l'épiaison, à la floraison et à la fécondation ;

une phase de maturation qui correspond au remplissage et dessiccation des grains, et qui se déroule sur 20 à 30 jours pour la Souna 3.

C'est une espèce des zones chaudes : la température moyenne optimale est de 28°C. Au Sénégal, elle est largement cultivée au détriment du sorgho, entre les isohyètes 400 et 1 000 mm (ORSTOM, 1976). En zone sahélienne, elle est cultivée sur des sols ferrugineux tropicals peu lessivés (plus de 65 % de sables et moins de 18 % d'argiles), développés sur sables quaternaires d'origine fluviale.

Au Sénégal, il est cultivé traditionnellement, en association avec une légumineuse (*Vigna unguiculata* (L.) Walp) ou moins fréquemment en culture sur un précédent légumineux (souvent arachide) dans des parcelles couvertes de *Acacia albida*. La densité de semis est de 4000 à 7000 poquets par ha généralement réparti sur des lignes (90 cm entre deux poquets) espacées de 90 cm.

Le semis se fait à sec à la main à une profondeur variant de 10 à 15 cm. Les opérations d'installation et d'entretien de la culture (labour, sarclage, démariage...), sont réalisées avec des outils relativement rudimentaires (houe, charrue...) attelés sur des chevaux ou des ânes et dans une moindre proportion sur des boeufs. En milieu paysan la fertilisation minérale de la culture de mil est relativement faible. La dose moyenne appliquée au niveau national est parmi la plus faible du monde (6,4 kg/ha).

D'après O.M.M. (1993), la production faible de 300 à 600 kg/ha est fortement limitée par des attaques de champignons et insectes dont les plus importants sont :

pour les champignons : *Sclerospora graminicola* (Sacc.) Schroet ou mildiou du mil, *Claviceps fusiformis* Loveless ou ergot ou maladie sucrée, et *Toxyosporium penicillariae* Bref. (charbon) ;

pour les insectes *Raghuva albipunctella* ou mineuse des épis et *Acigonia ignefusalis* (borer des tiges). deux ennemis majeurs à cause de leur grande incidence et de la gravité des dommages qu'ils causent.

Ces dommages causés par les champignons et insectes sur la production de la culture, en plus de nombreuses contraintes d'ordre agronomique, agropédo-climatique, variétal (Fofana, 1996), ont poussé les chercheurs à mettre à la disposition des paysans des variétés locales améliorées, des hybrides, et des synthétiques.

1.2. Acquis de la recherche agroforestière

D'après Dancette (1984), l'association culturale est valable lorsque la pluviométrie est égale ou supérieure aux besoins en eau. Selon cet auteur, la culture en zone arborée qui est une forme d'association spéciale constitue une exception, et est même une condition de survie de l'agriculture sahélo-soudanienne. Cette association qui est une stratégie novatrice afin d'accroître la production alimentaire au Sahel, repose sur une utilisation écologiquement viable des terres.

Elle consiste à concilier les arbres ou arbustes aux cultures dans les systèmes de culture ou d'élevage (ICRAF, 1995). Selon la disposition dans le temps et dans l'espace des arbres ou arbustes, qui influe sur la concurrence avec les cultures (Marshall et al., 1992), plusieurs systèmes d'agroforesterie existent au Sénégal.

Le système agroforestier traditionnel prospère là où des ligneux pérennes sont conservés de manière dispersée dans les parcelles de culture, et on peut citer comme exemple les parcs à

Faidherbia albida (Marshall *et al.*, 1992). Ce système qui prédomine dans la majeure partie des zones semi-arides, est considéré comme un excellent système agroforestier. Ceci est justifié par l'exemple des **parcs à *Faidherbia albida*** au Sénégal où on a remarqué une amélioration notable de la fertilité des sols et des rendements des cultures annuelles sous le couvert de l'espèce.

Le système de cultures en couloir où des cultures sont installées dans des couloirs entre des haies d'arbres souvent fixateurs d'azote (Ganry et Dommergues, 1993). Ce système a suscité un intérêt considérable en tant que substitut stable à la culture itinérante. Les arbres sont souvent émondés et les émondages constituent un engrais vert ou *mulch* pouvant améliorer la qualité des sols et le rendement des cultures associées (Ganry et Dommergues, 1993). Ce système était perçu auparavant comme le modèle le plus avantageux même si le taux d'adoption était faible et décourageant. Par exemple une culture de maïs en couloir entre des haies de *Leucaena leucocephala* est 20 % plus productive que la monoculture de maïs (Ganry et Dommergues, 1993).

Dans la plupart des systèmes de culture, où les deux principaux facteurs limitant de la production sont l'eau et l'azote, il serait intéressant d'associer les cultures aux arbres (particulièrement les légumineuses) qui contribuent sur la fertilité des sols et le rendement des cultures (Charreau, 1979). Ainsi de nombreux résultats, mêmes s'ils ont porté sur quelques espèces pérennes, ont montré l'importance des arbres d'une manière générale et particulièrement les légumineuses sur la gestion de la fertilité des sols, l'état hydrique des sols et la productivité des cultures.

1.2.1. Arbre et alimentation en eau des cultures annuelles

Les cultures annuelles et le couvert herbacé s'alimentent en eau à partir du stock hydrique des sols relativement profonds et sableux (Dancette et Niang, 1979). Cette disponibilité de l'eau du sol pour les plantes varie en relation avec différents facteurs écologiques : l'humidité relative de l'air, la pluie, la température, les propriétés physico-chimiques du sol, et la teneur en matière organique du sol (Aho *et al.*, 1980). L'arbre, de par son action sur ces derniers, peut donc agir sur le bilan hydrique du sol.

Ainsi, l'infiltration et la conductivité hydrique du sol sous ombrage se trouvent améliorées par rapport aux zones hors couvert (Belsky *et al.*, 1989), ceci grâce à une amélioration des propriétés physiques du sol sous le couvert arboré. Sous l'effet de *Acacia albida*, Charreau et Vidal (1965) ont montré que l'humidité équivalente augmente modérément mais régulièrement de l'extérieur du couvert vers le tronc ; elle est de 24 % à la limite de la frondaison et de 43 % aux proximités du tronc. Jung (1967) a révélé que cette humidité augmentait de 52 % sous le couvert de *Acacia albida*, l'humidité au point de flétrissement (pF_4) de 72 %, la capacité de rétention ($pF_{2,6}$) de 51 % par rapport aux zones hors couvert.

Par ailleurs, Ovalle et Avendano (1988) indiquent que les réserves maximales en eau disponible dans le sol entre 0 et 50 cm de profondeur sont de 69 mm dans un peuplement de *Acacia caven* au Chili dont le recouvrement arboré est de 80 %, alors qu'elle est de 66 mm dans une parcelle non couverte. Cette variation du stock d'eau sous le couvert arboré influe avec la variation d'autres paramètres (vitesse du vent, température, l'évapotranspiration potentielle etc.). Dans un peuplement de *Acacia albida* d'une densité de 25 à 30 individus à l'ha, l'évapotranspiration réelle (ETR) est 50 % moins élevée en saison sèche que dans un champ nu, et de 10 % pendant la saison des pluies (Schoch, 1966).

1.2.2. Arbre et nutrition azotée des cultures annuelles

D'une manière générale, les cultures, à l'exception de certaines légumineuses, tirent leur azote à partir du sol sous forme ammoniacale ou nitrrique. Dans les sols diors du Sénégal, la disponibilité en azote minéral est de 30 à 40 kg/ha. Elle est essentiellement représentée dans l'horizon 0-30 cm (Vidal, 1963). Cet azote minéral résulte, par l'intermédiaire de: l'activité des micro-organismes du sol, de la minéralisation de la fraction organique libre et de l'humus, suivie d'une ammonification et d'une nitrification Il est déficitaire dans la plupart des systèmes culturaux (déficit moyen annuel de 25 kg/ha), et varie périodiquement sous l'action de plusieurs facteurs notamment l'humidité du sol, la température, la composition de la litière, l'activité des micro-organismes du sol (Mourreau, 1967).

Des études ont montré que chacun de ces facteurs se trouve amélioré sous l'impact du couvert arboré. Ganry et Dommergues (1993) ont montré que l'arbre améliore qualitativement et quantitativement l'activité des micro-organismes du sol. Elle est 2 à 5 fois plus élevée sous couvert d'*Acacia albida* (dans les 20 premiers centimètres) que hors couvert (dans les 10 premiers centimètres) L'accumulation des débris végétaux et des fèces d'animaux se trouve plus importante sous le couvert arboré par rapport aux zones hors couvert Ovalle et Avendano (1988) ont révélé dans un peuplement de *Acacia caven* au Chili que la production de litière en provenance des feuilles est de 725 kg MS/ha/an dans la parcelle où le taux de couverture arboré est de 50 %, alors qu'elle est de 1163 kg MS/ha/an dans la parcelle où le taux de couverture est de 80 %.

Dans la même lancée, Tamba (1995) a estimé la quantité de fientes déposée par les oiseaux sur un site dont le taux de couverture arboré est de 37,6 % soit 23,5 % pour *Acacia raddiana*, 12,5 % pour *Balanites aegytiaca*, et 1,6 % pour *Boscia senegalensis*. Elle indique qu'elle est de 564 g/j sous le couvert, et de 1,9 g/j hors couvert. Par conséquent, la teneur en azote des sols sous le couvert arboré se trouve beaucoup plus améliorée par rapport à la zone découverte. Tamba (1995) précise également que cette quantité de fientes apportée par les oiseaux sur une parcelle arborée par an correspond à 31,8 % et 10 % de la quantité d'azote et de phosphore recommandé pour les cultures de mil, et estime que cette quantité est surtout localisée sous le couvert arboré. Cette amélioration du niveau d'azote sous le couvert arboré est très notoire chez certaines espèces telles que les légumineuses qui ont en plus la capacité de fixer l'azote de l'air assurant ainsi au moins partiellement la nutrition azotée des cultures associées (Ganry et Dommergues, 1993). La quantité annuelle d'azote minéral est de 60 kg/ha sous *Acacia albida*, et de 45 kg/ha en dehors du couvert arboré (Charreau et Vidal, 1965) Ces mêmes auteurs ont montré un très net gradient de fertilité en allant de l'extérieur du couvert vers le tronc de l'arbre : une augmentation moyenne de 2,03 % de carbone total (ce qui représente un apport de 55 t de matière organique sèche à l'hectare), le taux d'azote augmente de 0,29 % soit 460 kg d'azote ou 1,150 t d'urée. Des résultats semblables ont été observés sur la même espèce par Jung (1967) qui a trouvé une augmentation de l'azote de 5,4 ppm dans la zone sous couvert par rapport à la zone hors couvert. Akpo et Grouzis (1997) ont trouvé sous le couvert arboré une forte minéralisation de l'azote utilisable par les plantes par rapport aux zones hors couvert..

1.2.3. Arbre et productivité des cultures

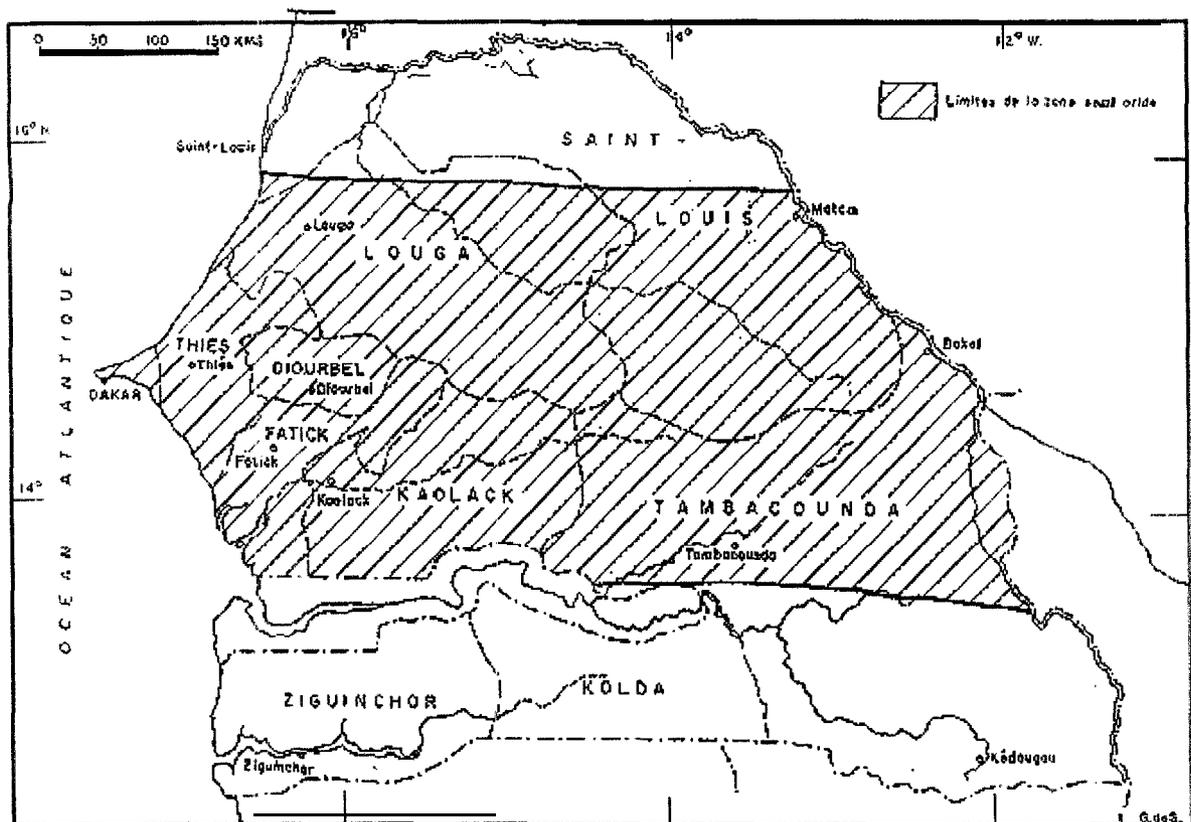
Le rendement des céréales est la combinaison de plusieurs paramètres, notamment le nombre de poquet à l'hectare, le nombre d'épis par poquet, le nombre de grains par épis, le poids d'un grain. De nombreux résultats ont montré une augmentation de ces paramètres sous couvert arboré notamment les acacias qui ont en plus le pouvoir d'enrichir le sol en azote. Cette

variation est spectaculaire en absence de fertilisation sous l'effet de *Faidherbia albida* (Dancette et Poulain, 1968). Une amélioration du rendement épis et grains a été observée sous couvert de *Faidherbia albida* (rayon moyen du houppier (4,9 m) par Louppe *et al.* (1996). Ces auteurs montrent que ce rendement commence à décroître à la limite du houppier jusqu'à 3 m où l'effet de l'arbre ne se fait plus sentir. Dans ce sens, Maïga (1997) évoque une augmentation du nombre de grains de sorgho et de mil sous couvert de *Faidherbia albida* comme dans sa périphérie immédiate (2-3 m hors couvert) par rapport aux témoins hors influence des arbres : respectivement de 45 % et de 36 % pour le sorgho, 76 % et 75 % pour le mil. Les travaux de Olivier (1990) dans le parc de Watinoma au Burkina Faso ont révélé l'effet améliorateur de *Faidherbia albida* sur le nombre de tige et d'épis par hectare du sorgho. Charreau et Vidal (1965) ont montré à Bambey que le rendement en grains se trouve multiplié par 2,5 pour les plants de mil croissant au voisinage des troncs de *Acacia albida* grâce à une augmentation du nombre d'épis

2. MATERIEL ET METHODES

2.7. Site expérimental

L'essai a été implanté en milieu rural à Fintel Somb (14°35' N, 16°16' O), village situé dans la région de Diourbel (Carte 1). C'est une région caractérisée par un climat de type sahélo-soudanien, avec une longue saison sèche de novembre à juin, et une courte saison des pluies de juillet à octobre.



Carte 1 : Localisation du site d'étude.

L'évolution interannuelle de la pluviométrie de la région de Diourbel (**Figure 1**) montre une forte variabilité avec un coefficient de variation de 34% durant la période 1950-1997 pour une moyenne annuelle de 570,7 mm. Ce coefficient de variation intègre bien la gamme de 25 à 45% donnée par Le Houérou (1989) pour la partie nord de l'Afrique.

Deux grandes périodes se distinguent :

de 1950 à 1970 où la pluviométrie a été excédentaire par rapport à la moyenne :

de 1970 à 1997 où on a assisté à l'installation effective de la sécheresse.

L'évolution de la pluviométrie moyenne mensuelle de la période de 1950 à 1997 montre que l'hivernage s'installe dans la région de Diourbel en juillet, et s'étale en moyenne sur 4 mois (jusqu'en octobre). Il apparaît que le mois d'août est le plus pluvieux avec 36,8% du cumul annuel, et que 67,5% de pluviométrie sont reçus entre le mois d'août et le mois de septembre (Figure 2).

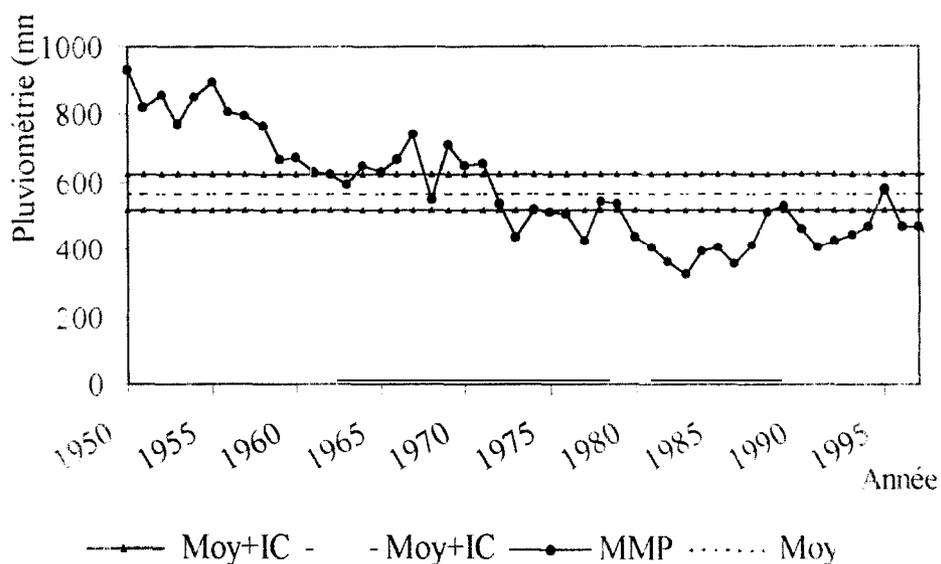


Figure 1 : Evolution interannuelle de la pluviométrie dans la région de Diourbel.
Moy : moyenne ; MMP : moyenne mobile pondérée ; Moy+IC : moyenne plus intervalle de confiance ; Moy-IC : moyenne moins intervalle de confiance

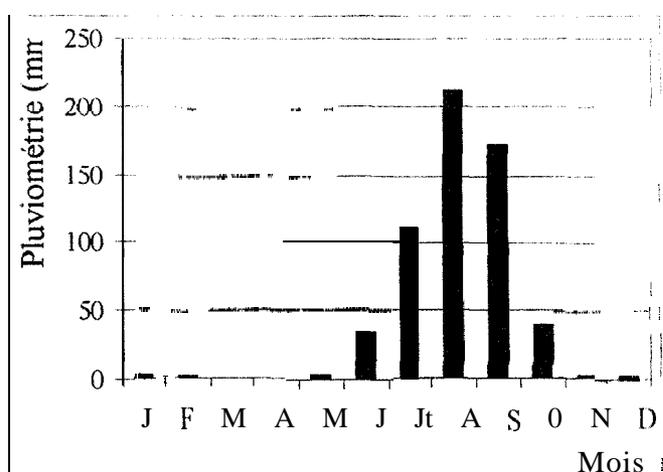


Figure 2 : Répartition interannuelle de la pluviométrie mensuelle dans la région de Diourbel.

Les sols de la zone sont de type ferrugineux tropical lessivé sur sable siliceux (dior). Ce sont des sols pauvres en matière organique et en argile, avec une faible capacité de rétention.

La végétation naturelle est caractérisée par une strate ligneuse dominée principalement par *Faidherbia albida*, *Balanites aegyptiaca*, *Acacia senegal* et *Acacia seyal*, par un tapis arbustif composé essentiellement de *Guiera senegalensis* et de *Combretum* (Badiane, 1998).

Dans cette contrée du Sénégal, le projet agroforestier de Diourbel (FIDA) en collaboration avec l'ISRA, a mis en place plusieurs dispositifs agroforestiers (stations protégées) en milieu paysan dans le cadre de la recherche d'accompagnement. Parmi celles-ci, la station de Fintel Somb a été retenue pour abriter cet essai.

2.2. Matériel végétal

Dans cet essai, le cultivar *Souna 3*, variété synthétique obtenue en 1969 à l'ISRA (CNRA de Bambey) à partir d'un croisement de 8 lignées tirées des populations P028 et PC32, a été étudié. Au stade adulte (95 jours après semis), elle atteint une hauteur de 242 cm avec des épis de 52 cm de long et des grains de couleur jaune olive (poids moyen de 1000 grains égal à 7,6 g). C'est une variété sensible au mildiou, peu sensible au charbon, assez sensible à l'ergot.

En milieu contrôlé, elle peut donner un rendement maximum de 3,5 t/ha (Fofana, 1997). Le choix de cette variété s'explique par son cycle court qui s'adapte bien aux conditions pluviométriques de la zone d'étude.

Pour les essences arborées, les espèces *Acacia senegal* et *Acacia raddiana* ont été retenues. Les individus de ces deux espèces ont 8 ans d'âge (implantés depuis 1990), et leur diamètre à hauteur de poitrine tronc varie entre 10 et 11 cm. Le rayon du houppier des arbres varie entre 2 et 3,34 m puis entre 1 et 1,07 m respectivement pour *Acacia raddiana* et *Acacia senegal*.

2.3. Dispositif expérimental

Le dispositif initial d'implantation de la station est un split-plot à 3 facteurs :

espèce d'arbre avec trois niveaux : *Acacia raddiana*, *Acacia senegal*, et *Acacia albida* ;

mycorhization avec deux niveaux : sans ou avec mycorhize ;

matière organique avec deux niveaux : sans ou avec matière organique

Il comprend huit blocs de 45 m x 30 m avec des plants (12 plants/bloc) espacés de 15 m entre les lignes et sur les lignes. Après la transplantation, deux espèces ont survécu (*Acacia senegal* et *Acacia raddiana*), et font actuellement l'objet d'un suivi forestier (Photo I).



Photo 1 : Parcelle agroforestière de Fintel Somb

Dans le cadre de ce travail, nous avons retenu les blocs 2, 4, et 6, qui renferment chacun 4 arbres de ces 3 espèces. Les autres blocs ayant reçu de la fumure organique apportée par le paysan en fin de saison sèche (mai-juin), n'ont pas fait l'objet d'un suivi durant la période d'étude. Par ailleurs, 3 placettes témoins sans arbre ont été également choisies au niveau de chaque bloc.

2.4. Méthode

2.4.1. Conduite de la culture

La culture a été implantée sur un précédent arachide. Le semis a été effectué à sec le 02/08/98, à la densité de 90 cm x 90 cm, et les semences ont préalablement été traitées au fongicide (SPINOX-T). La première pluie a été enregistrée le 4/08 avec une hauteur de 50 mm., et un premier sarclage mécanique a été réalisé le 17/08/98, suivi d'un démarriage à trois pieds par poquet. Le désherbage a été régulièrement fait, et un traitement phytosanitaire à l'Arrivo opère suite à une attaque foliaire de pucerons et de chenilles. La récolte a été effectuée le 02.11/1998, suivie d'un séchage de la biomasse, et d'un battage des épis le 09/10/1998.

2.4.2. Paramètres étudiés et méthodes de mesure

2.4.2.1. Suivi des paramètres climatiques

Pour caractériser les conditions microclimatiques sous et hors du couvert ligneux, un suivi hebdomadaire des paramètres suivants a été effectué :

la pluviométrie à l'aide de trois pluviomètres installés respectivement sur une parcelle hors couvert, sous la couronne d'un individu d'*Acacia raddiana* et celle d'un *Acacia senegal* ,

le rayonnement photosynthétiquement actif (PAR) à l'aide du capteur Li- 1 90S d'un poromètre Licor- 1600 (Licor Inc., Lincoln, Nebraska, USA) ,

le déficit de pression de vapeur (demande évaporative) calculé à l'aide du logiciel SANJI à partir des températures humides et sèches mesurées en psychromètre ventilé

2.4.2.2. Suivi du bilan hydrique du sol

2.4.2.2.1. Equation du bilan hydrique

Le suivi du bilan hydrique du sol est nécessaire pour estimer la consommation en eau (ETR) du mil et des ligneux.. Pour une période donnée, ce bilan hydrique est la différence entre les apports et sorties d'eau pour une tranche de sol donnée, et s'écrit sous la forme

$$\Delta S = P \pm R - ETR - D + \Omega \text{ (en mm),}$$

avec ΔS = variation du stock hydrique dans la couche de sol (0 , z) ; P = pluviosité de la période considérée ; R = ruissellement ; D = drainage ; ETR = évapotranspiration réelle ; Ω = remontée capillaire.

Les caractéristiques topographiques et pédologiques du site d'étude nous ont permis de négliger certains de ces composantes du bilan, tels que le ruissellement, le drainage et la remontée capillaire après le 1^{er} septembre. Avant cette date, les fortes pluies tombées au mois d'août ont entraîné un drainage et un ruissellement qui ont été estimés par simulation partir d'un modèle utilisé dans la zone, et pris en compte.

En définitive, l'équation s'est réduite à : $\Delta S = P - ETR$, d'où $ETR = P - \Delta S$

Pour déterminer cette variation de stock, la méthode neutronique a été retenue à cause de sa rapidité de mise en œuvre, de sa fiabilité; et de la possibilité de réalisation du suivi de l'humidité *in situ* dans le temps en un point donné (Diouf, 1996).

2.4.2.2. Principe de la méthode neutronique

Cette méthode, qui est un moyen non destructif de mesure de l'humidité volumique du sol, repose sur le ralentissement des neutrons rapides émis par une source radioactive constituée d'Américium et de Béryllium (Am-Be), et introduite dans le sol. Ce processus dit de thermalisation est dû aux chocs successifs que subissent les neutrons rapides avec les atomes d'hydrogène de l'eau du sol (Sall, 1988 ; Diouf, 1993). Ainsi, l'humidimètre à neutrons de type Troxler utilisé effectue le comptage du nombre de neutrons thermalisés à l'aide d'un dispositif comprenant, un détecteur d'impulsion et un préamplificateur.

Ce nombre étant fonction à l'humidité volumique du sol, une relation de proportionnalité de type $H_v = a_n + b_n \times N_r$, avec H_v : humidité volumique, et N_r : nombre corrigé de neutrons, a_n et b_n sont des coefficients à déterminer pour chaque horizon du profil ou de chaque tranche de sol, a été établie à partir de l'étalonnage de l'appareil.

2.4.2.2.3. Etalonnage

La méthode neutronique considérée isolément présente des limites car :

elle ne permet pas une lecture directe de l'humidité volumique du sol ;

“appareil comptabilise les neutrons thermalisés par l'eau de constitution de l'argile et de la matière organique ;

certaines corps chimiques comme le chlore et le bore ont la capacité d'absorber les neutrons; même en quantité faible (Sall, 1988 ; Diouf, 1993).

Pour intégrer ces imperfections, un étalonnage de l'appareil a été effectué à partir de mesures réalisées pendant l'installation de l'essai (16/07/98), en pleine saison des pluies, et en fin de saison des pluies respectivement. L'opération consiste à déterminer l'humidité pondérale des échantillons de sol prélevés à différentes cotes du profil avec des pas réguliers de 10 cm. Le poids frais (pf) des échantillons prélevés est immédiatement déterminé par pesée, le poids sec (ps) est obtenu après passage à l'étuve à 105°C jusqu'à poids constant (48h). Ainsi, l'humidité pondérale est calculée par la formule $H_p (\%) = (pf-ps)/ps$. Par la suite, l'humidité volumique est déterminée par la formule $H_v (\text{en cm}^3.\text{cm}^{-3}) = H_p \times d.a.$, où d.a. représente la densité apparente obtenue par mesure directe à l'aide d'un gamma-densimètre.

Le comptage réduit (N_r) est calculé à partir du comptage *in situ* effectué avec la sonde à neutrons Troxler T7. On obtient ainsi N_r par la formule : $N_r = (N/N_e) \times 1000$ avec : 1000 comptages de référence de l'eau pure libre, N comptage *in situ*, et N_e comptage étui.

On établit ensuite la liaison entre H_v et N_r à l'aide d'une régression linéaire (Figure 3).

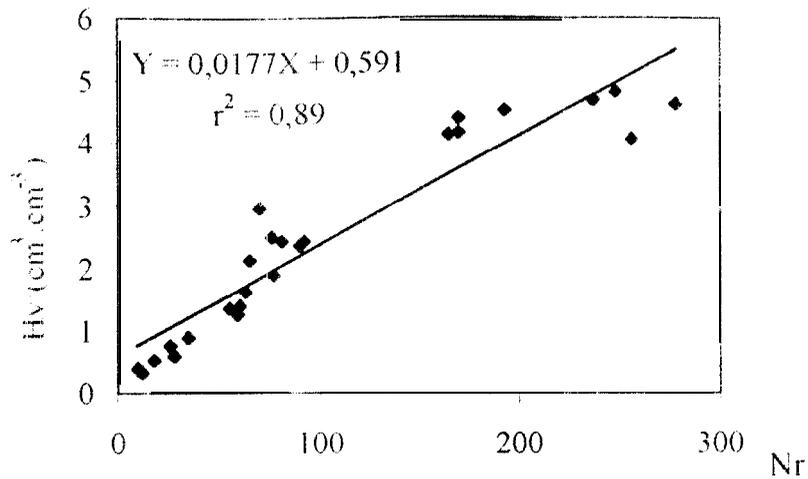


Figure 3 : Droite d'étalonnage de l'appareil Troxler. Nr : comptage réduit ou corrigé humidité volumique du sol

Cette corrélation hautement significative obtenue ($r^2 = 0,89$) permet d'utiliser valablement cette relation pour déterminer l'humidité correspondant aux différents comptages neutroniques réalisés.

2.4.2.2.4. Protocole de mesure

Le suivi du stock hydrique, mais aussi du développement de la culture a été effectué de façon hebdomadaire avec la sonde à neutrons Troxler T7 par l'intermédiaire de 7 tubes d'accès en duralumin ($\phi = 45$ mm. L = 5 m) préalablement installés dont :

- trois le long du transect sous-hors couvert *Acacia raddiana* sous couvert, à 7 m et à 14 m du tronc ,
- trois le long du transects sous-hors couvert *Acacia senegal* sous couvert, à 8 m et à 16 m du tronc ;
- un sur la parcelle témoin sans arbre.

2.4.2.3. Suivi de la biomasse microbienne et de l'azote minéral du sol

Dans l'objectif de déterminer l'impact des ligneux sur la nutrition azotée de la culture au cours de l'expérimentation, nous avons effectué, à partir d'échantillons de sol (horizon 0-20 cm) des analyses au niveau du laboratoire de Bio-pédologie de l'ORSTOM/Bel-Air. Elles ont porté sur la biomasse microbienne totale et la forme minérale de l'azote du sol.

2.4.2.3.1. Echantillonnage

Trois séries de prélèvements ont été effectuées pour ce suivi, correspondant respectivement aux dates du 8 septembre, du 6 octobre, et du 26 octobre. Dans chaque série, des échantillons de sol ont été prélevés dans l'horizon 0-20 cm où l'on retrouve le potentiel de l'activité des micro-organismes, et l'accumulation maximale de la matière organique.

Les prélèvements ont été effectués sous couvert et hors couvert des différents individus d'acacias des 3 blocs (2, 4, et 6) retenus, et sur la parcelle témoin. Au total, 51 échantillons ont été recueillis par série, dont 24 sur l'association *Acacia senegal*/mil, 24 sur l'association *Acacia raddiana*/mil et 3 sur la parcelle témoin. Au niveau de chaque individu, le prélèvement composite a été réalisé sous le couvert à proximité du tronc (à 0-10 cm du tronc), puis un second hors couvert (2 à 2,5 m de la limite de la frondaison).

2.4.2.3.2. Suivi de la biomasse microbienne totale

Ce suivi consiste à déterminer aux différentes dates la biomasse microbienne totale. Cette détermination a été effectuée par la méthode de fumigation/extraction au chloroforme (Amato et Ladd, 1988), et le dosage se fait par colorimétrie à la ninhydrine.

Le principe repose sur l'extraction par une solution de KCl de l'azote alpha-aminé contenu dans le micro-organisme du sol, dont la libération s'effectue après incubation de 10 jours au chloroforme (fumigation). Nous procédons au préalable à l'analyse de l'azote alpha-aminé contenu dans les extraits au temps TO (quantité d'azote alpha-aminé présente dans le sol avant fumigation). Au dixième jour de l'incubation, la quantité d'azote alpha aminé contenue dans les extraits au temps T10 (quantité d'azote alpha aminé présente dans le sol après fumigation) est déterminée. La différence entre le T10 et le TO représente la quantité d'azote alpha-aminé libérée par les micro-organismes au cours de la fumigation.

2.4.2.3.3. Suivi de l'azote minéral du sol

Le suivi de l'azote minéral du sol se fait par le dosage colorimétrique de la forme ammoniacale (NH_4^+) et des nitrates.

2.4.2.3.3.1. Dosage de l'azote ammoniacal (N-NH_4)

Le dosage de l'azote ammoniacal est fait par colorimétrie selon la réaction de Berthelot au bleu d'indophénol après avoir complexé les métaux lourds qui pourraient interférer sur le dosage. La lecture se fait à la longueur d'onde 660 nm.

2.4.2.3.3.2. Dosage de l'azote nitritique (N-NO_3)

Les nitrates des extraits sont réduits en nitrites qui sont dosés en colorimétrie à la longueur d'onde 520 nm. Les matières organiques des extraits sont séparés par dialyse afin d'éviter toute interférence.

2.4.2.4. Observations phénologiques et mesures agronomiques

Dans le but de caractériser le comportement agromorphologique du mil sous l'effet de *Acacia senegal* et *Acacia raddiana*, nous avons effectué un certain nombre d'observations et de mesures sur quatre pieds choisis au hasard au niveau des différentes placettes circulaires (de même diamètre que les arbres repères) délimitées au début de l'essai aux distances indiquées au 2.4.2.2.4.

2.4.2.4.1. Observations phénologiques

2.4.2.4.1.1. Phénologie du mil

Ces observations ont porté sur la date de semis, la levée, la montaison, l'épiaison, la floraison mâle et femelle. Chacun de ces stades a été considéré comme atteint lorsque 50 % des pieds de la placette circulaire le présentent. Ces observations ont été effectuées de manière hebdomadaire au niveau des placettes circulaires délimitées sous couvert et hors couvert, et ont permis de décrire la phénologie de la culture pendant le cycle cultural.

2.4.2.4.1.2. Phénologie des ligneux

Les observations phénologiques des ligneux ont été faites dans le but de corréler l'évolution les paramètres microclimatiques, le développement du couvert ligneux et de la culture. Ces observations ont été effectuées sur l'ensemble des individus des blocs retenus, et portaient sur

la feuillaison, la floraison, et la fructification. Chacune de ces phases est atteinte pour un individu quand ce dernier présente l'un des stades 2, 3, et 4 proposés par Grouzis (1991) et Diouf (1996) ; les stades 1 et 5 marquant respectivement l'installation et la fin de ces phases

- Pour la feuillaison

V1 : gonflement des bourgeons, pas de feuilles développées.

V2 : bourgeons foliaires + feuilles épanouies (plus de 10 % et moins de 50 % des rameaux de l'individu).

V3 : feuilles en majorité épanouies.

V4 : feuilles vertes + feuilles sèches ou ayant changé de couleur (plus de 10 % et moins de 50 %).

V5 : plus de 50 % des rameaux de l'individu ont des feuilles sèches ; chute des feuilles

- Pour la floraison

f1 : bourgeons floraux uniquement ;

f2 : bourgeons floraux et fleurs épanouies (plus de 10 % et moins de 50 %)

f3 : plus de 50 % des rameaux portent des fleurs épanouies ;

f4 : fleurs épanouies + fleurs sèches (plus de 10 % et moins de 50 %) ;

f5 : fleurs sèches en majorité ; chute des pièces florales.

- Pour la fructification

F1 : nouaison

F2 : phase d'évolution du fruit jusqu'à sa taille normale.

F3 : maturité du fruit

F4 : fruit mûr + début de dissémination (ouverture des gousses ou chute des fruits)

F5 : fruit entièrement sec et chute.

Ainsi, la fréquence d'individu en phase est donnée par la formule : $P \% = (n/N) \times 100$ avec $P \%$ désigne selon la phase, $V \%$, $f \%$ ou $F \%$; n : nombre d'individus en phase ; N : effectif de la population.

2.4.2.4.2. Suivi de la croissance et du développement de la culture

Le suivi de la croissance et du développement de la culture de mil a été effectué, et a porté sur des paramètres tels que :

la hauteur des tiges (distance entre la base et la dernière ligule visible) ;

le nombre de feuilles, d'épis, et la longueur des épis ;

l'indice foliaire, qui représente la surface de feuilles rapportée à l'unité de surface de sol, et qui caractérise la structure du couvert. Cet indice a été mesuré avec un analyseur de surface foliaire Licor LAI-2000 (Licor Inc., Lincoln, Nebraska, USA). C'est un appareil est constitué

d'un boîtier de lecture, d'une manche munie d'un câble de connexion et de caches de différentes tailles

Son principe de mesure repose sur la différence entre le flux quantique incident (pendant la mesure) au-dessus de la canopée et celui mesuré en différents points sous la canopée. Ainsi, la pénétration du rayonnement solaire à travers le couvert, fournira une estimation directe et fiable de la structure du feuillage du mil en-dessous des acacias, et en dehors du couvert ligneux.

2.4.2.4.3. Le rendement et ses composantes

Pour déterminer le rendement sous et hors du couvert des arbres (*A. raddiana*, *A. senegal*), les composantes suivantes ont été mesurées : le poids de 1000 grains, le poids sec épi, le nombre d'épi productifs, la biomasse aérienne, le nombre de grains par mètre carré. Pour ce faire, les récoltes ont été effectuées sous couvert dans des placettes circulaires de diamètre égal à celui du houppier des arbres, (au nombre de 9 sous *A. senegal* et 9 sous *A. raddiana*) et des placettes témoins de même diamètre situées hors couvert (9 placettes).

2.4.2.5. Méthodes d'analyse

Les données ont été traitées à l'aide du tableur Excel 97. L'analyse de variance (ANOVA) a été effectuée avec le logiciel STATITCF, et le test de Newman-Keuls (au seuil de 5%) de discrimination des moyennes a été utilisé pour détecter les différences entre les niveaux de facteurs.

3. RESULTATS ET DISCUSSION

3.1. Résultats

3.1.1. Caractéristiques micro-climatiques du site d'étude

Au cours de la période d'étude, un cumul pluviométrique de 386 mm a été enregistré. Il apparaît que cette pluviométrie est déficitaire de 184,7 mm par rapport à la 'moyenne de 570,7 mm obtenue pour la période 1950-1997. Cependant, en terme de répartition, cette hauteur moyenne cache une certaine disparité.

On peut ainsi constater une répartition irrégulière avec, d'une part, une concentration des pluies dans les 2 premières décades du mois d'août (53,1 %), et d'autre part, une absence d'averse à la fin du mois de septembre correspondant pratiquement à la fin de l'hivernage (Figure 4).

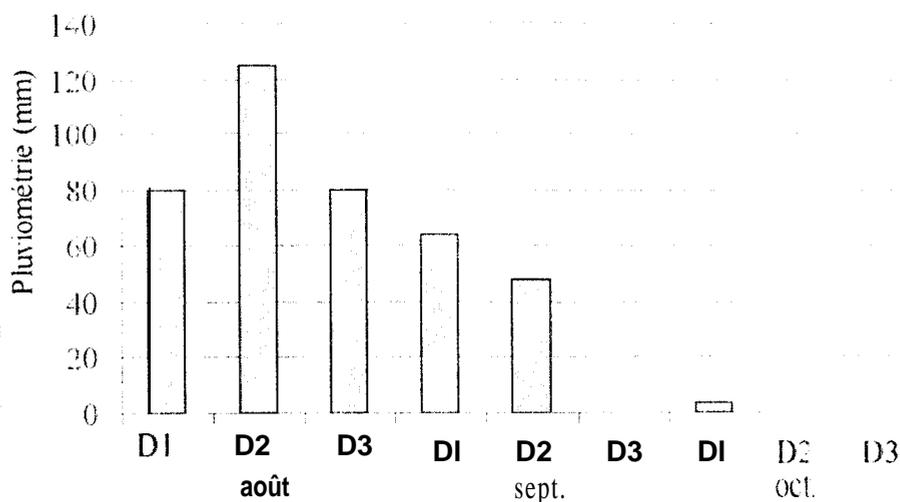


Figure 4 : Répartition décadaire de la pluviométrie au cours de la période d'étude

Par ailleurs, pour caractériser les conditions micro-climatiques de la croissance et du développement de la culture, nous avons suivi concomitamment certains de ces paramètres sous la couronne des arbres et hors du couvert. Le tableau I permet de montrer que le rayonnement est significativement réduit (20 %) sous les houppiers, alors que les hauteurs de pluies enregistrées ainsi que le déficit de pression de vapeur de l'air (DPV : demande évaporative) restent très peu variables.

Tableau I : Quelques paramètres micro-climatiques sous et hors couvert

Situation	P (mm)	PAR ($\mu\text{mol.m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	DPV (mbar)
Témoin	386	1732	2,7
Sous <i>A. raddiana</i>	376	340	2,3
Sous <i>A. senegal</i>	382	340	2,3

Cette réduction importante du PAR (5 fois) s'explique par le développement plus important du feuillage pendant la saison pluvieuse, et corrobore les résultats de Belsky *et al.* (1989), de Kessler (1992), de Mordelet (1993), et de Akpo et Grouzis (1997).

3.1.2. Bilan hydrique sous et hors du houppier

Dans cette partie du travail, nous présentons les résultats sur la dynamique de l'eau dans le sol et la consommation des composantes arbres et culture ; ceci, à l'aide des profils hydriques et du calcul de l'ETR respectivement.

3.1.2.1. Profils hydriques sous et hors couvert

La figure 5 présente l'évolution saisonnière de l'humidité du sol sous le couvert des arbres (*A. raddiana* et *A. senegal*) et dans les zones découvertes, Ces profils hydriques ont été établis sur

l'épaisseur de sol 0-449 cm qui englobe les systèmes racinaires des deux composantes arbre et culture. On peut globalement distinguer 2 phases

- une phase de recharge après les premières pluies ; et,
- une phase de diminution de l'humidité vers la fin de l'hivernage.

A la fin de la saison sèche, le profil sec montre pour la tranche de sol (0-50 cm) présente des humidités plus élevées sous couvert (1 à 1,5 $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$) qu'en dehors. En début de campagne (11/08 : 9 jas), la figure 5 montre que seuls les horizons de surface sont humectés, avec un front d'humectation qui arrive à 160 cm hors couvert et sous *A. raddiana* (Figure 5 a et 5 b), et à 120 cm sous *A. senegal* (Figure 5c). Ici, on peut noter également une dépression en dents de scie correspondant à la zone d'extraction racinaire du mil (hors couvert) et des 2 strates arbre et mil.

En pleine saison de pluies (18/08 au 22/09), on a enregistré un maximum d'apport d'eau (53 %), et on constate que le front d'humectation se situe à 220 cm avec une humidité maximale de 9 $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ de sol et 6 $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ sous *A. raddiana* et *A. senegal* respectivement. Par contre, pour la parcelle témoin, il atteint 250 cm pour une humidité plus forte égale à 13,5 $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$.

Sur ce profil, on peut noter l'existence de 2 dépressions 70-80 cm et 120 cm correspondant aux zones d'absorption racinaire du mil et des arbres d'une part, et des arbres seuls d'autre part. Par ailleurs, il apparaît qu'en dehors du couvert, le profil humide descend plus en profondeur avec un front qui arrive à 250 cm par rapport à ceux obtenus sous les arbres (220 cm sous *A. raddiana* et 180 cm sous *A. senegal*).

Cette différence s'explique par une meilleure exploitation de la ressource eau (absorption) sous couvert, tandis que pour le témoin, cette eau percole pour humecter les horizons plus profonds. Ce profil le plus humide permet aussi de constater que l'avancement du front d'humectation est plus rapide en dehors que sous le couvert.

On peut remarquer sur ces profils que l'humidité du sol a été plus variable en surface qu'en profondeur d'une part, et d'autre part, sous les arbres par rapport au témoin. En outre, les profils de fin de saison pluvieuse (22/09 et 2/11) font apparaître un dessèchement plus rapide en surface, du fait de l'absorption racinaire et de l'évaporation. Pendant cette période, l'humidité est plus élevée en profondeur (150-450 cm) hors des houppiers que sous couvert en raison de l'absorption des arbres.

Globalement, il ressort qu'en terme de cinétique, la recharge est plus rapide hors couvert que sous les arbres, ce qui explique qu'en fin de saison pluvieuse, avec moins d'extraction racinaire, les réserves de profondeur soient plus importantes sur le témoin. Par ailleurs, l'analyse des profils ne permet pas de matérialiser une compétition entre les composantes arbre et culture (ampleur des dépressions), et laisse donc penser à l'existence de relations de complémentarité.

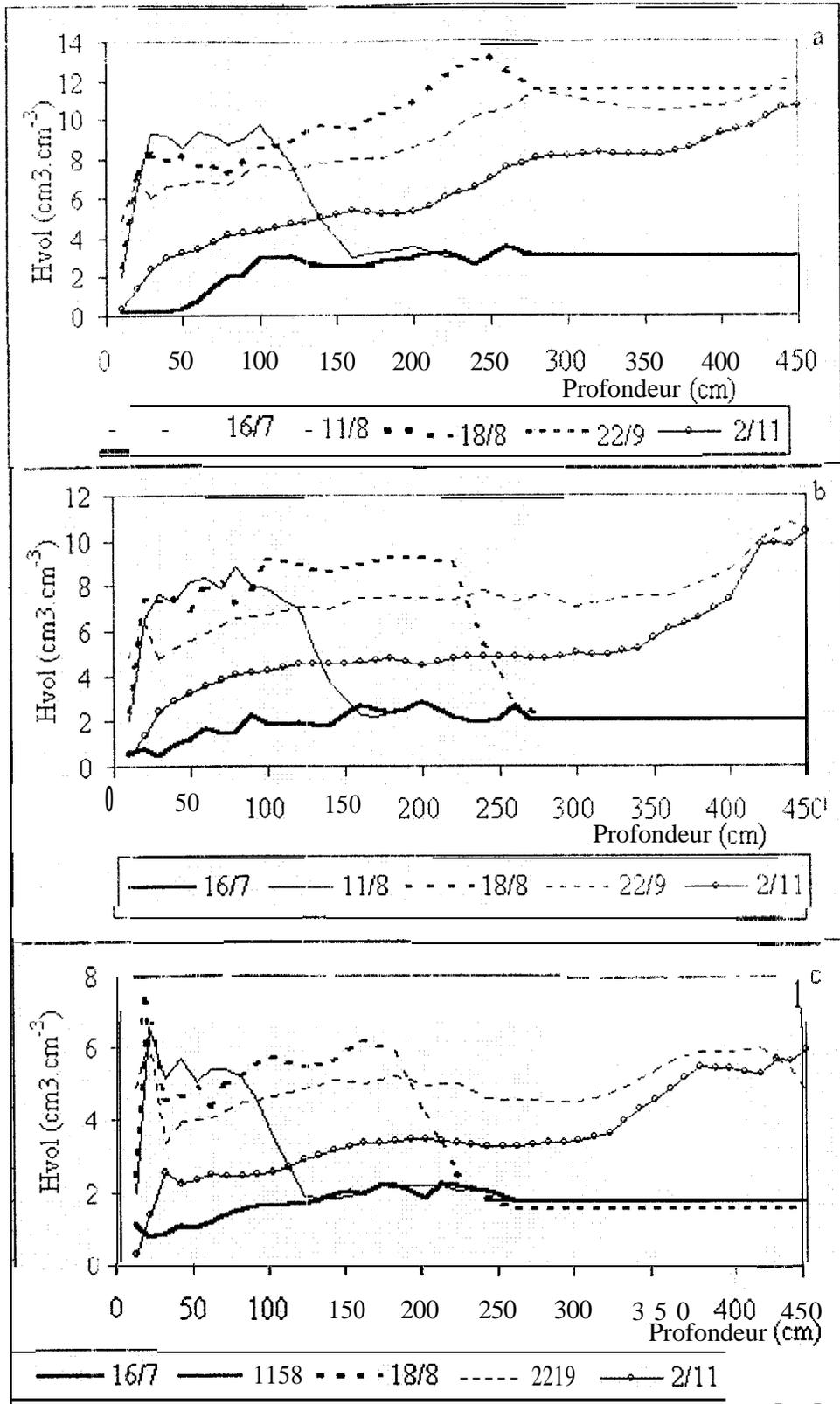


Figure 5 : Profils hydriques sous et hors couvert des arbres.

3.1.2.2. Analyse de la consommation hydrique (ETR) sous et hors couvert

Comme pour les profils hydriques, la détermination de l'ETR a été effectuée en considérant l'épaisseur de sol 0-450 cm qui intègre les systèmes racinaires des arbres et de la culture. Les résultats obtenus [Tableau II) nous montrent que la consommation saisonnière en eau de la culture varie selon qu'on est sous couvert des ligneux (*A. raddiana* et *A. senegal*), et sur la

parcelle témoin sans arbres. Cette variation a été étudiée le long des deux transects avec un gradient sous-hors couvert pour chacune des deux espèces. Ainsi, il ressort que sous le couvert des deux espèces, l'ETR moyenne obtenue qui correspond à la consommation en eau de la culture et des ligneux est près de 2 fois plus élevée sous les arbres (357,2 mm) qu'en dehors (209,1 mm)

Cette meilleure consommation liée à une plus grande disponibilité de l'eau sous la couronne des arbres corrobore les observations de Dancette et Poulain (1968) au Sénégal. Pour *A. raddiana*, ces résultats sur la consommation en eau sous couvert viennent conforter ceux de Nizinski et Grouzis (1991) même si ces derniers ont été obtenus dans un système arbre/herbe

Quant aux apports, les cumuls obtenus montrent que sous le couvert des arbres, les quantités d'eau reçues sont légèrement plus faibles du fait de l'interception d'une partie des pluies par le feuillage, et par la suite, de l'évaporation au-dessus du couvert. Cette faiblesse des pertes (2,5% sous *A. raddiana* et 1% sous *A. senegal*) est liée à la fois, à la nature de feuillage (feuilles fines) et des pluies (fortes averses) et à l'âge des arbres (8 ans). Dans ce sens Dancette et Poulain (1968) puis Belsky *et al.* (1989) montrent respectivement que les pluies fines peuvent être totalement interceptées, alors que les fortes averses réduisent l'interception

Tableau II : Pluviométrie et consommation en eau des cultures suivant un transect sous-hors couvert chez *Acacia raddiana* et *Acacia senegal*.

Situation	P (mm)	ETR ₄₅₀ (mm)
Témoin	386	202,7
Sous <i>A. raddiana</i>	376	363,4
Distance 7 m de <i>A. raddiana</i>)	386	200,1
Distance 14 m de <i>A. raddiana</i>)	386	198,4
Sous <i>A. senegal</i>	382	351
Distance 8 m de <i>A. senegal</i>	386	188,3
Distance 16 m de <i>A. senegal</i>	386	226,2

3.1.3. Nutrition azotée

3.1.3.1. Biomasse microbienne totale

Les figures 6 et 7 montrent que la quantité de micro-organismes (bactéries champignons et actinomycètes) présente dans le sol durant toute la période d'étude, est nettement plus élevée sous le couvert des acacias que dans les parcelles hors couvert (à 2,5 m du tronc des arbres et dans la parcelle témoin sans arbres) (Figure 6). Cette augmentation est plus importante sous *Acacia raddiana* que sous *Acacia senegal*. En moyenne, nous avons obtenu sous *Acacia raddiana* 149,59 et 159,16 µgC/g de sol respectivement aux dates du 8/09, du 6/10, et du 26/10 contre, 66,37, et 72,88 µgC/g de sol à 2,5 m du tronc des arbres, et, 56,9, 0,1, et 60 µg de C/g de sol dans la parcelle témoin sans arbres aux mêmes dates. Soit une augmentation de 125,7 % et 161,86 % sous *Acacia raddiana* par rapport aux zones à 2,5 m et la parcelle témoin.

Sous l'effet de *Acacia senegal*, la même tendance a été notée avec en moyenne 146,5 et 150,4 µgC/g de sol sous l'arbre contre 65,36 et 55,60,18 µgC/g de sol à 2,5 m du tronc de l'arbre et 56,9, 0,1 et 60 µgC/g de sol dans la parcelle témoin sans arbres, Soit une

augmentation de 124,61 % et 156,59 % sous couvert par rapport aux zones hors couvert respectivement à 2,5 m de l'arbre et dans la parcelle sans arbres. Cette variation de la quantité de micro-organisme, sous et hors couvert, obscurée entre les différentes périodes de prélèvement caractérisant chacune des points humides. Ainsi, la biomasse la plus élevée a été obtenue au 08/09 avec une humidité du sol (dans l'horizon 0-20 cm) de $2,68 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ de sol qui correspond à la période où le maximum de pluie a été enregistré. Elle est faible tout juste à la fin de l'hivernage (le 06/10), où l'humidité du sol dans l'horizon 0-20 cm est de $1,53 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ sous couvert et de $1,50 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ hors couvert, avant de devenir à nouveau importante le 26/10.

Ces résultats obtenus sur l'ensemble des deux associations corroborent ceux de Jung (1970) sous le couvert de *Acacia albida* où l'activité biologique est globalement plus élevée quelle que soit la période.

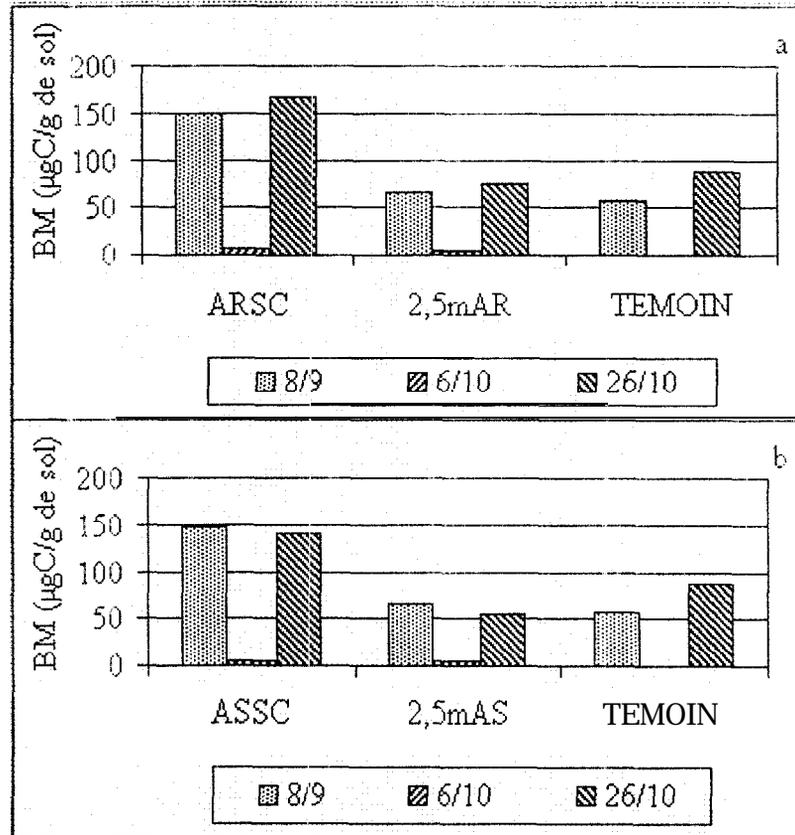


Figure 6 Evolution de la biomasse microbienne sous et hors couvert arboré.

SCAR : Sous couvert *A. raddiana* ; 2,5 m AR : à 2,5 m de *A. raddiana* .

SCAS : sous couvert *A. senegal* ; 2,5m AS : à 2,5m de *A. senegal*.

Par ailleurs, la figure 7 permet de constater que la biomasse microbienne est relativement plus importante sous *A. raddiana* si ce dernier est associé au mil. Ceci constitue un avantage qui pourrait contribuer à améliorer la disponibilité en minéraux (azote surtout) dans le contexte de l'association.

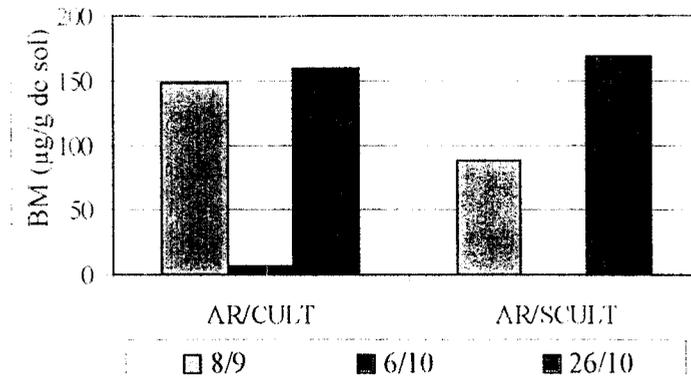


Figure 7 Evolution de la biomasse microbienne sous et hors couvert arboré
 AR/CULT : *A. raddiana* avec culture ; AR/SCULT : *A. raddiana* sans culture.

3.1.3.2. Azote minéral

Les résultats obtenus durant toute la période d'étude montrent des teneurs en azote minéral (ammoniacal et nitrique) du sol quasiment nulles sur l'ensemble des placettes Les trace;; obtenues n'ont pas permis de faire une distinction entre les placettes sous couvert et les témoins Cette faible teneur en azote, même pendant les périodes de forte activité microbienne. pourrait s'expliquer d'une part, par l'exportation par la culture et d'autre part, par le lessivage que peuvent entraîner les fortes pluies.

3.1.4, Mesures agronomiques

3.1.4.1. Observations phénologiques

3.1.4.1.1. Phénologie des ligneux

L'observation du spectre phénoïgique des deux espèces sur la figure 8 nous permet de montrer que les individus de *A. raddiana* et *A. senegal* gardaient leurs feuilles durant toute la période d'étude considérée. Ce résultat confirme les travaux de Aubréville (1950) et de Diouf (1996) sur *Acacia raddiana*, et permet d'expliquer la réduction importante du PAR sous le couvert des arbres Par contre, la floraison et par conséquent la fructification étaient nulles chez tous les individus de *A. raddiana*, alors que chez les *A. senegal*, elles ont été dès le début des observations (début septembre) avec 66% pour la floraison et 15% pour la fructification. Cette floraison maximale s'est maintenue jusqu'en début octobre pour ensuite montrer d'abord une baisse, puis s'annule. Elle reprendra vers la fin octobre-début novembre ; période correspondant à la fin de la saison de culture. Quant à la fructification, même si elle semble montrer une réduction pendant le mois d'octobre, elle présente un accroissement continu jusqu'à la fin de la saison pluvieuse.

Ces résultats permettent de constater que *A. senegal* garde quasiment une feuillaison; une floraison et une fructification continue pendant la saison de culture.

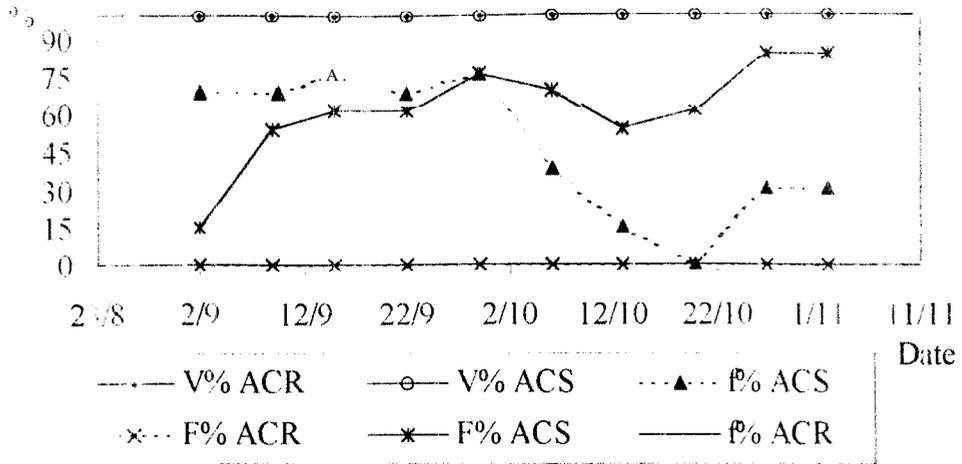


Figure 8 Spectre phénologique de *Acacia raddiana* et *Acacia senegal*

3.1.4.1.2. Comportement agromorphologique de la culture sous et hors couvert des ligneux.

Le suivi agromorphologique du mil sous et hors couvert a été effectué le long d'un transect sous-hors houppier, et a porté sur la hauteur du brin-maître, le nombre de feuilles, le nombre et la longueur des épis

3.1.4.1.2.1. Hauteur du brin-maître.

La figure 9 qui décrit l'évolution de la hauteur du mil à différentes distances du tronc des arbres, et montre que les individus qui se trouvent sous le couvert des arbres ont une hauteur plus importante durant tout le cycle par rapport à ceux situés à 7 m et 14 m du tronc pour *A. raddiana*, et à 8 m et 16 m pour *A. senegal*. Il apparaît que sous *A. raddiana* (Arsc) la hauteur maximale atteinte est de 150 cm, alors qu'elle se situe en moyenne à 110 cm et 90 cm pour les pieds se situant respectivement à 14 m et 7 m (Figure 9a). Cette évolution est maintenue sous le couvert de *A. senegal* (Assc) (Figure 9b) avec une hauteur maximale de 110 cm inférieure à celle obtenue sous *A. raddiana*. On peut donc constater que la croissance est plus accrue sous *A. raddiana*, et la hauteur maximale est toujours atteinte à partir du 65^{ème} jas correspondant à la phase épiaison-floraison. Par ailleurs, les différences observées entre les individus situés à 7 m ou 8 m et 14 ou 15 m ne sont pas significatives, et ces parcelles sont apparues comme des témoins absolus. Il faut toutefois signaler que cette croissance a été quelque peu yénée par les branches des arbres et surtout à la limite de la frondaison.

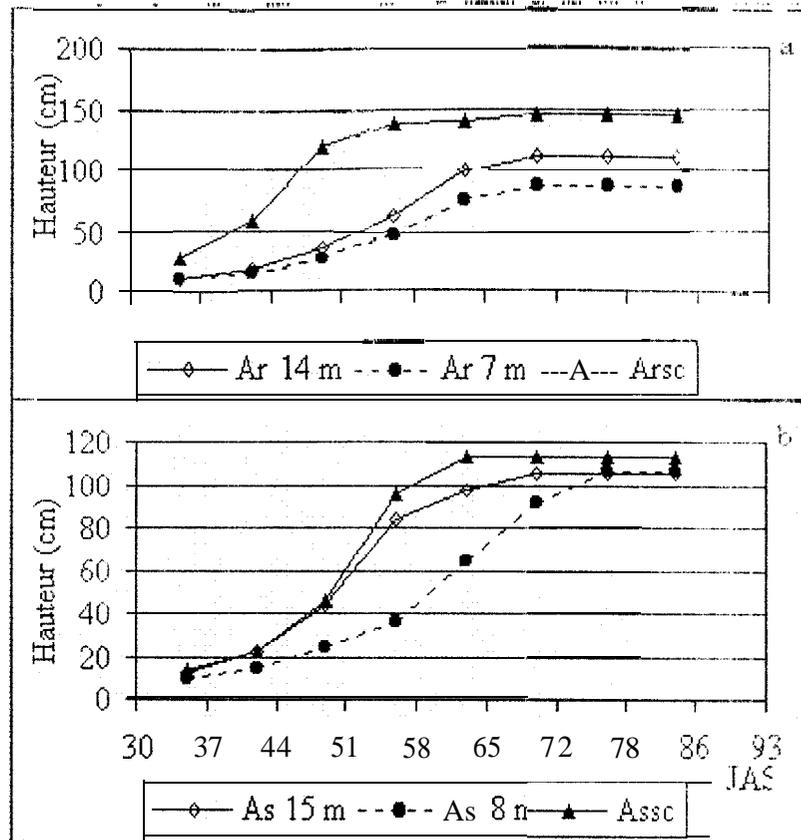


Figure 9 Evolution de la hauteur du brin-mâtre au cours du cycle suivant le transect sous-hors couvert chez *A. raddiana* et *A. senegal*.

3.1.4.1.2.2. Nombre de feuilles.

La figure 10 montre que le plus grand nombre de feuille par poquet a été observé sous la canopée de *A. raddiana* avec un maximum de 50 feuilles à 51 jas. Sous *A. senegal*, l'évolution du nombre de feuille est quasiment semblable. Ce maximum de 50 feuilles est obtenu au même moment que sous *A. raddiana* (Figure 10 b). On peut aussi noter que l'augmentation du nombre de feuilles est plus rapide (pentes des courbes) sous le couvert qu'en dehors.

Par contre, on note le long du transect (7, 8, 14 et 15 m) un nombre moyen de feuilles inférieur (35 à 45). Ce résultat corrobore ceux de Maïga (1997) qui souligne une production de feuilles importante sous le couvert de *Faidherbia albida*.

On peut également constater que le nombre de feuilles diminue après le 65^{ème} jas du fait de l'installation de la phase de sénescence marquée par le dessèchement et la chute des feuilles basales.

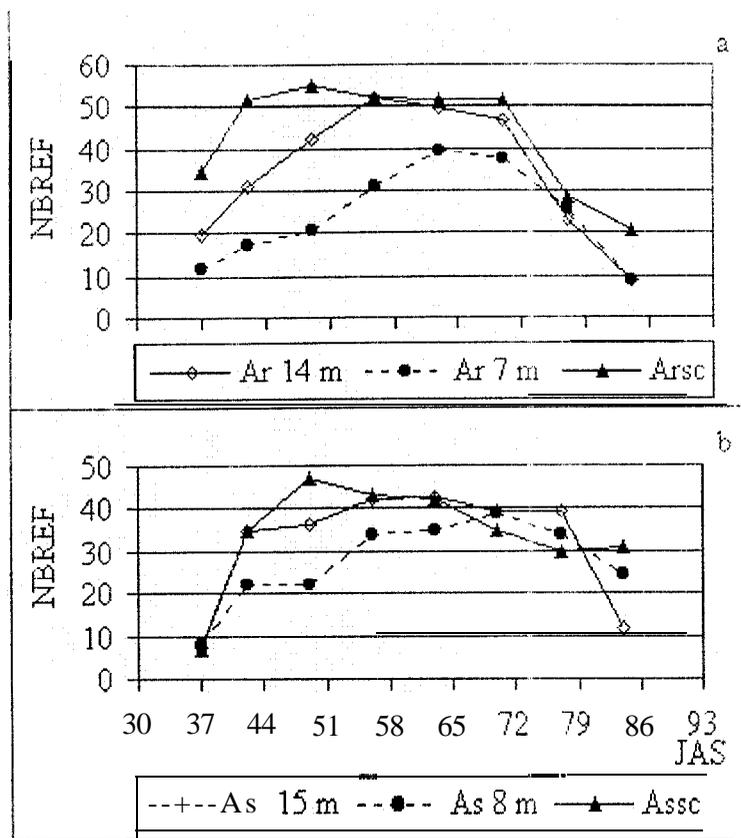


Figure 10 Evolution du nombre de feuilles (NBREF) au cours du cycle suivant un transect sous-hors couvert chez *A. raddiana* et *A. senegal*.

3.1.4.1.2.3. Nombre d'épis

Les figures 11 et 12 montrent que, pendant la phase épiaisowmuration, le nombre d'épis et la longueur des épis ont toujours la même tendance au niveau du transect, c'est à dire des épis plus nombreux et plus longs sous *A. raddiana* que sous *A. senegal*. 11 ressort aussi qu'à la fois l'épiaison, le nombre et la croissance des épis sont plus rapides (pentes des courbes) sous couvert, même si on retrouve quasiment des épis de même longueur vers la fin du cycle. Le cumul du nombre d'épis de la culture se trouvant sous la canopée de *A. raddiana* est plus important par rapport à ceux obtenus à 14 m et 7 m. Sous *A. raddiana* nous avons obtenu, à l'étape ultime de croissance de la culture (58 jas), en moyenne 4 épis par pieds de longueur égale à 40 cm, alors qu'à 14 m et 7 m le nombre d'épis obtenu est respectivement 3 et 2 avec des longueurs de 38 cm et 36 cm. Ces longueurs d'épis hors couvert ont été obtenus plus tard (72 jas) que celle sous couvert.

Le long du transect de *A. senegal*, nous avons toujours la même tendance. Le nombre d'épis est sensiblement pareil dans les deux situations (Figure 11 b). La croissance ultime (40 cm) de l'épis a été observé à 72 jas. Toutefois, on ne note pas dans ce cas de différence significative entre les parcelles couvertes et les parcelles découvertes.

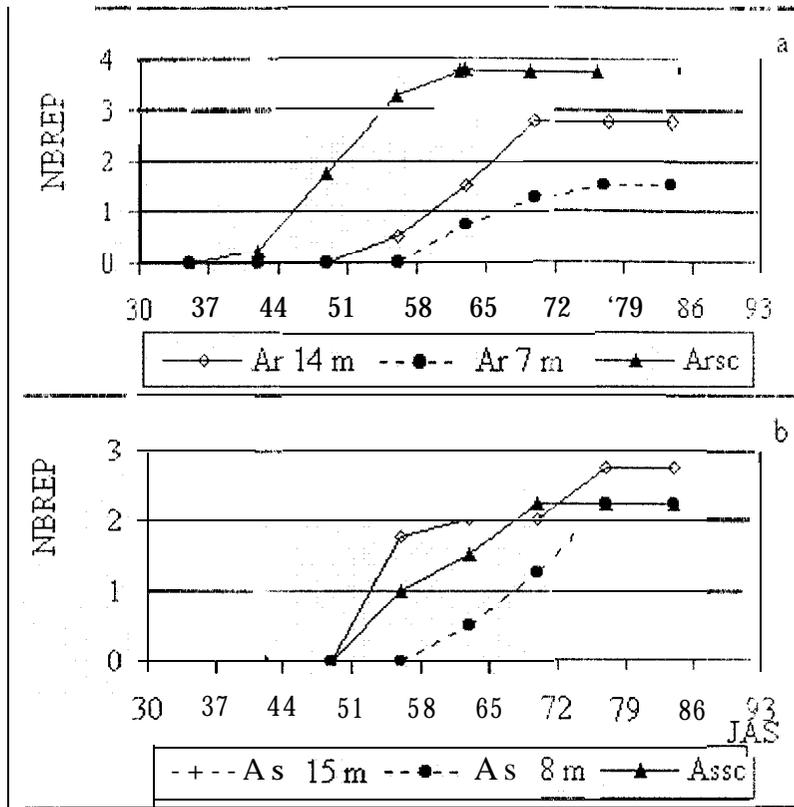


Figure 11: Evolution du nombre d'épis (NBREP) suivant un transect sous-hors couvert chez *Acacia raddiana* et *Acacia senegal*.

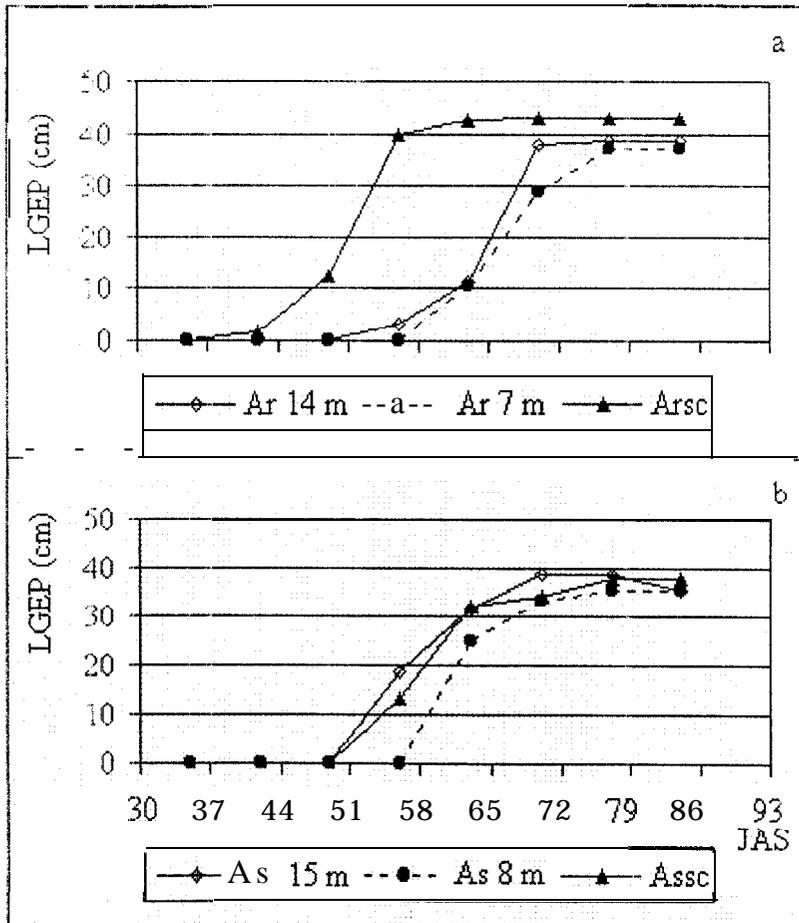


Figure 12: Evolution de la longueur des épis (LGEP) pendant la phase épiation-maturité suivant un transect sous-hors couvert chez *Acacia raddiana* et *Acacia senegal*.

3.1.4.1.2.4. Evolution de l'indice foliaire ou LAI (Leaf Area Index) au cours du développement de la culture sous et hors couvert

L'indice foliaire qui caractérise la structure du couvert et le développement de la culture permet de distinguer les individus sous couvert des pieds découverts (Figure 13). On peut remarquer qu'et; début de cycle le développement est plus rapide sous *A. raddiana* qu'en dehors (à 7 m et 14 m). Il atteint un maximum au 65^{ème} jas pour des indices respectifs de 2,5, 1,5, et 1,25 sous *A. raddiana*, à 14 m et 7 m. A partir de cette date, on constate une réduction du LAI due à la sénescence.

On peut noter que le développement foliaire est plus important sous *A. raddiana* avec un LAI de maximal 2,5 que sous *A. senegal* où le LAI maximal est égal à 1,75 (Figure 13). Sous *A. senegal* même si au début du cycle la croissance semble être plus rapide sous le couvert, la figure 13 b me révèle pas de différence le long du transect où les individus présentent une cinétique de croissance similaire, Comme sous *A. raddiana*, cette croissance maximale est atteinte à 65 jas

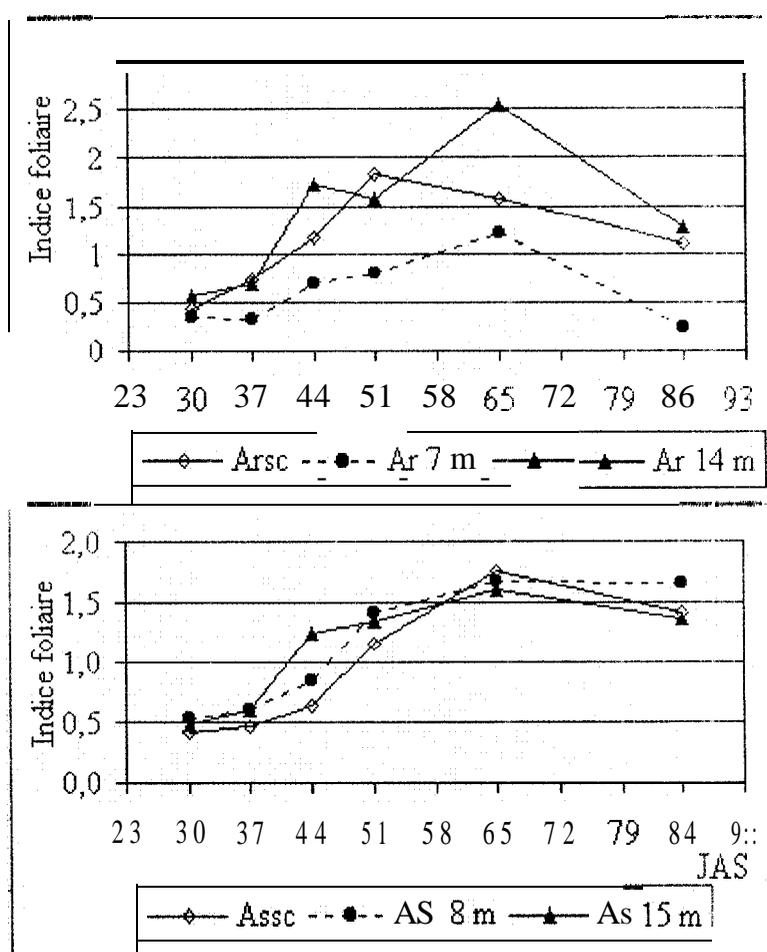


Figure 13 : Evolution de l'indice foliaire au cours du développement de la culture sous et hors couvert .

3.1.4.2. Effet des légumineuses sur le rendement et ses composantes

Le rendement étant la résultante de la combinaison de plusieurs paramètres tels que le nombre d'épis productifs, le poids sec épis, le nombre de grains par mètre carré, le poids de 1000 grains, nous avons tenté dans un premier temps de les analyser, et par la suite d'établir les corrélations qui pourraient exister entre eux.

3.1.4.2.1. Poids sec total des épis

La figure 14 montre que le poids sec total des épis obtenu sous le couvert de *Acacia raddiana* (en moyenne 611,1 g) est largement supérieur à celui obtenu sous *Acacia senegal* (341 g) et sur le témoin sans arbre, soit une augmentation de 270 g (soit 79 %). L'analyse statistique a montré des différences très hautement significatives ($F_{26/2} = 9,16^{***}$, $\alpha = 0,05$)

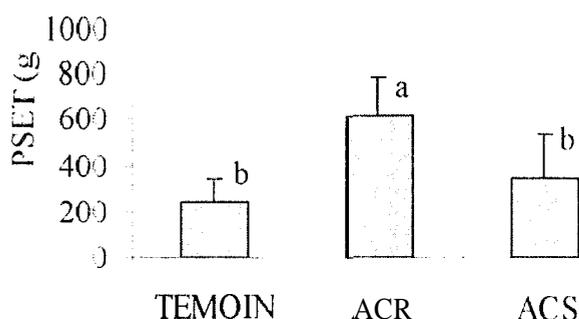


Figure 14: Poids sec total des épis sous *A. raddiana* et *A. senegal*, et dans la parcelle témoin

3.1.4.2.2. Matière sèche totale

La matière sèche totale obtenue varie aussi sous le couvert des espèces ligneuses par rapport à la zone sans arbres, différence d'ailleurs très significative. En moyenne, nous avons obtenu sous *A. raddiana* et *A. senegal* respectivement 2070,6 g et 1131,2 g contre 814 g au niveau de la parcelle témoin soit une différence de 1256,6 g et 317,2 g soit en valeur relative une augmentation de 154,4% et 39 % (Figure 15)

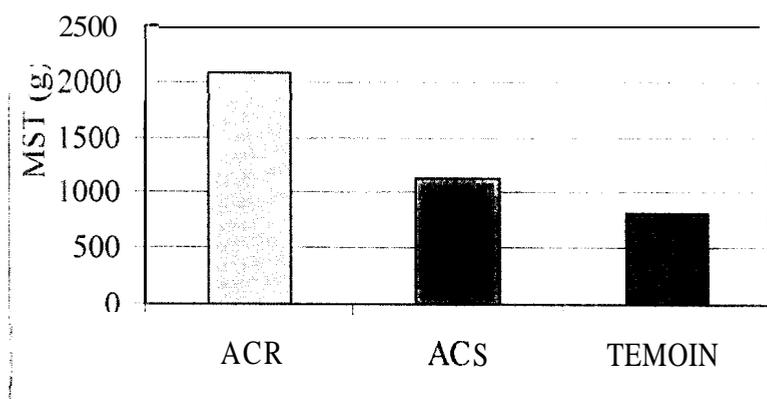


Figure 15 : Poids de matière sous *A. raddiana* et *A. senegal*, et dans la parcelle témoin

Ainsi, *A. raddiana* est de loin l'espèce qui affiche une amélioration beaucoup plus forte que celle *A. senegal* sur les deux paramètres étudiés. Au regard de ces résultats, on peut constater une amélioration plus ou moins importante selon le paramètre utilisé. On pourrait donc s'attendre à une augmentation de la production en grains sous le couvert des acacias par rapport à la parcelle sans arbres.

3.1.4.2.3. Nombre de grains par mètre carré

Pour le nombre de grains par mètre carré, la figure 16₁, nous montre que les résultats obtenus sous le couvert de *A. raddiana* sont différents de ceux obtenus sous *Acacia senegal* et de la parcelle hors couvert, une différence très hautement significatif ($F_{26/2} = 4,32^{***}$, $\alpha = 0,05$). En moyenne nous avons sous *A. raddiana*, sous *A. senegal* et sur la parcelle sans arbres respectivement 4655 grains/m², 2656 grains/m² et 2523 grains/m². Cependant, la différence entre le nombre de grains sous *Acacia senegal* et celui hors couvert dans la parcelle témoin n'est pas significative.

X1.4.2.4. Poids de 1000 grains

Pour le poids de 1000 grains la figure 16₂ permet de constater que les rendements obtenus ont été importants sous *A. raddiana*, *A. senegal* par rapport au témoin respectivement de 6,9 g, 6,3 g, et 5,21 g. L'analyse statistique a montré ces différences observées sont très hautement significatives ($F_{26/2} = 29,25^{***}$, $\alpha=0,05$). Cela se traduit un bon remplissage des grains sous le couvert des acacias par rapport aux zones hors couvert mais aussi, entre espèce le remplissage se fait beaucoup mieux sous le couvert de *A. raddiana* par rapport a celui de *Acacia senegal*.

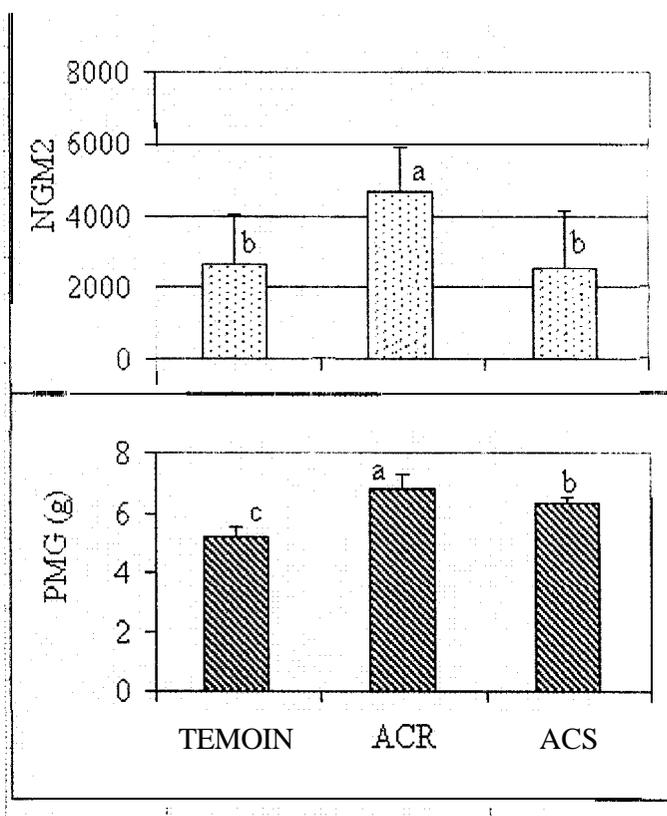


Figure 16 : Nombre de grains par m² (NGM2) et poids de 1000 grains (PMG) sous et hors couvert.

Ainsi, la variation significative de ces composantes du rendement sous couvert arboré par rapport à la zone témoin permet d'envisager une amélioration du rendement en grains, et en paille sous le couvert des légumineuses par rapport aux zones découvertes

3.1.4.2.5. Rendement en grain et en paille.

D'après l'analyse de variance, il apparaît que le rendement en grain est significativement différent entre les parcelles **sous** *A. raddiana*, celles sous *A. senegal* et **celles** sans arbres

(Figure 17). En moyenne, on a $312,5 \text{ kg ha}^{-1}$, $158,2 \text{ kg ha}^{-1}$, 139 kg ha^{-1} respectivement sous *A. raddiana*, sous *A. senegal* et sur les parcelles sans arbres soit une augmentation du rendement de 124,82 % sous *A. raddiana* et de 90% sous *A. senegal*. Des résultats semblables ont été trouvés sous *Acacia albida*, par Charreau et Vidal (1965) avec une amélioration du rendement en grains de 205 % sous *A. albida*, par Louppe *et al.* (1996) avec une amélioration du rendement en grains du mil de 72,86 % et par Olivier *et al.* (1996) avec une augmentation du rendement sorgho de 168,52 %.

Cette amélioration du rendement en grain sous le couvert des acacias s'observe aussi au niveau du rendement en paille. La différence des rendements en paille sous et hors couvert est hautement significative ($F_{26/2} = 13,43^{***}$, $\alpha = 0,05$) nous avons en moyenne sous *Acacia raddiana*, sous *Acacia senegal* et hors couvert respectivement $1459,3 \text{ kg ha}^{-1}$, $789,5 \text{ kg ha}^{-1}$ et 569 kg ha^{-1} soit une augmentation de 156,46 % sous *A. raddiana* et 84,83 % sous *Acacia senegal*.

Cependant même si les valeurs absolues de rendement sont inférieures à celui simulé pour le milieu paysan dans le département de Diourbel (605 kg), il faut **surtout** noter que cette partie a été particulièrement affectée à la fois par le retard des pluies (04/08) et la nature des averses. Ces pluies sont concentrées dans la première quinzaine d'août ont été très violentes. Ceci a favorisé le lessivage du sol et son épuisement en éléments minéraux d'où le retard de croissance pendant cette période. D'autre part, cette baisse est liée par une attaque de chandelle par les larves de Noctuelles (*Heliocheilus albipunctella*) dont les pertes ont été évaluées à la récolte. Cette attaque a été plus marquée sous la canopée des arbres qu'en dehors du couvert.

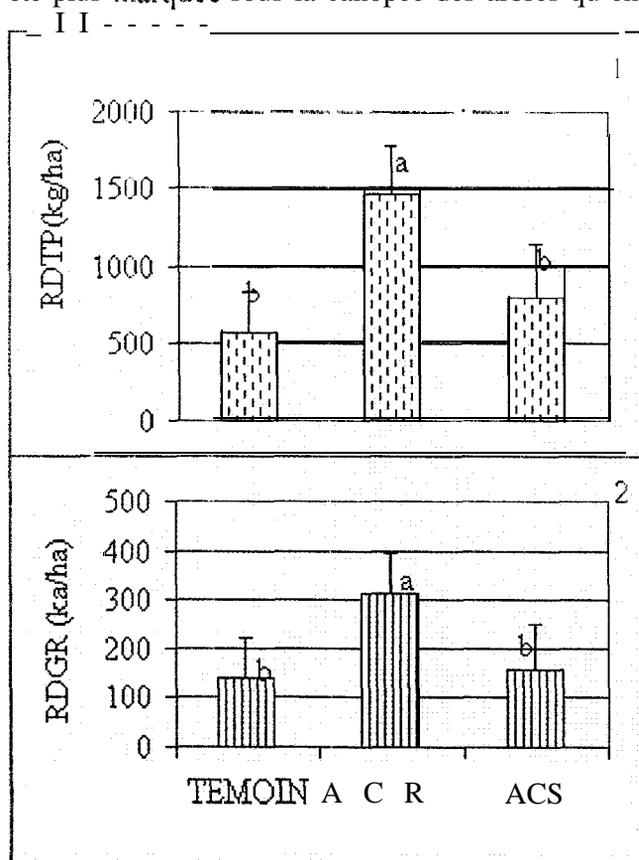


Figure 17 : Rendement en grain (RDTGP) et en paille (RDTP) sous couvert arboré et dans les placettes témoins.

Tableau III : Rendement et ses composantes pour différents niveaux d'influence des acacias.

Niveau d'influence	RDTG (kg \cdot ha $^{-1}$)	RDTP (kg \cdot ha $^{-1}$)	PMST (kg \cdot ha $^{-1}$)	PMG (g)	NGM2
Sous <i>A. raddiana</i>	312,5 \pm 82,1	1459,3 \pm 307,8	2070,6 \pm 439,1	6,8 \pm 0,48	5655 \pm 1213,3
Distance 15 m du tronc de <i>A. raddiana</i>	224,9	175,2	758,6	6,3	3570
Sous <i>A. senegal</i>	158,2 \pm 92,4	789,5 \pm 354,1	1131,2 \pm 524,5	6,3 \pm 0,24	2523,2 \pm 1376
Distance 16 m du tronc de <i>A. senegal</i>	149,6	500,2	773,7	5,8	2579
Temoin	139 \pm 82,6	569 \pm 260,7	814,4 \pm 336,	336,5 5,2 0,34	2656 \pm 1604

Globalement, nous pouvons dire que *Acacia raddiana* et *Acacia senegal* ont un effet améliorateur sur le rendement aussi bien en grains qu'en paille du mil Souna 3 mais l'effet est plus significatif sous le couvert de *Acacia raddiana* par rapport de celui de *Acacia senegal*

3 1.4.2.6. Corrélation entre le rendement et ses composantes

Il est apparu intéressant d'établir quelques corrélations pour préciser les relations existant entre le rendement et la consommation en eau de la plante d'une part, puis le rendement et certains de ses composantes d'autre part. Il apparait que le rendement en gains sous et hors couvert arboré est fortement corrélé au nombre de grains par mètre carré (Figure 18)

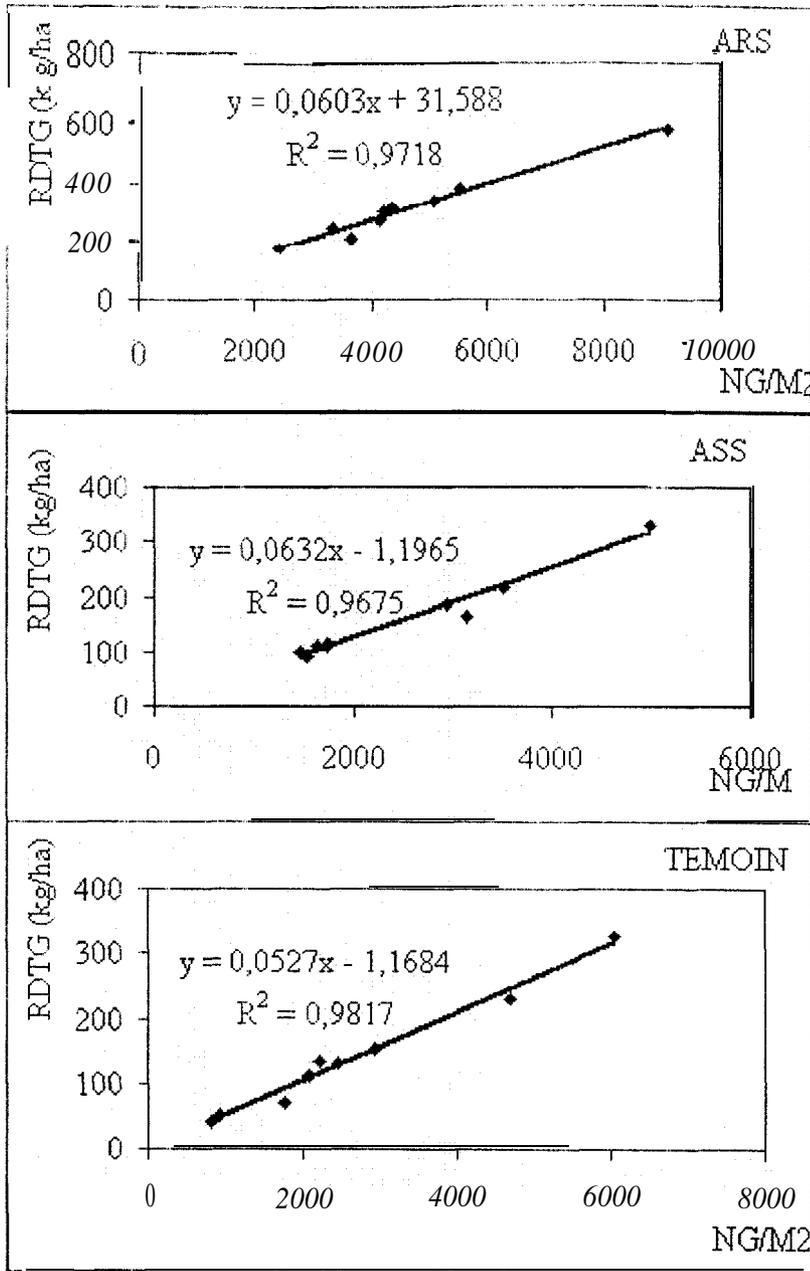


Figure 18: Relation entre le rendement en grains (RDTG) et le nombre de grains par mètre carré sous et hors couvert arboré.

3.1.4.2.7. Efficacité d'utilisation de l'eau

L'efficacité d'utilisation de l'eau (E.U.E.) représente la quantité de matière sèche totale produite par millimètre d'eau évapotranspirée. La figure 19 montre qu'elle est plus importante sous le couvert de *Acacia raddiana* (0,86 kg/ha/mm) par rapport au couvert de *Acacia senegal*, (0,45 kg/ha/mm) et au témoin (0,68 kg/ha/mm).

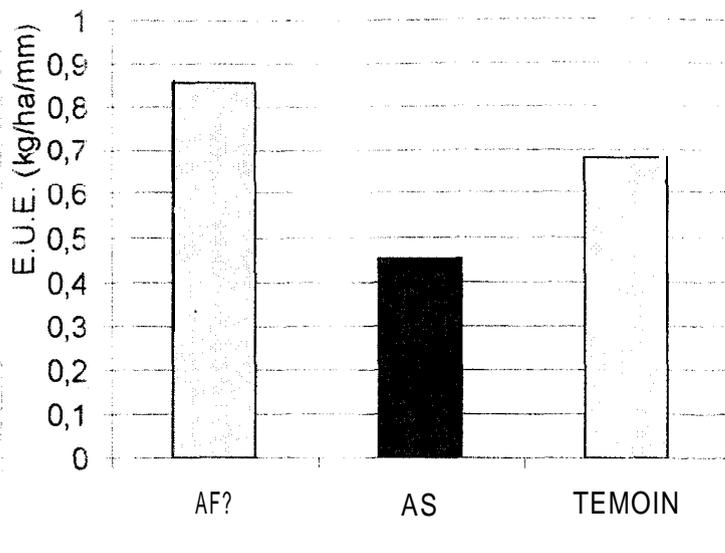


Figure 19 : Efficacité d'utilisation de l'eau sous et hors couvert arboré

Ceci peut s'expliquer par l'amélioration de la consommation en eau et des conditions édapho-climatiques notée sous le couvert de *A. raddiana*. Par rapport à *A. senegal*, il ressort que même si la consommation en eau est favorisée, la production n'a pas pour autant augmenté dans des proportions intéressantes par comparaison au témoin.

3.2, Discussion générale

Les résultats obtenus sur l'association légumineuses (*A. raddiana* et *A. senegal*)/ mil montrent que la productivité du mil Souna 3 est beaucoup plus élevée sous le couvert des acacias que hors couvert, avec une augmentation de 124,4 % du rendement en grains sous *A. raddiana* et 13,7% sous *Acacia senegal* par rapport à la parcelle témoin. Ces résultats corroborent ceux obtenus antérieurement (Charreau et Vidal, 1965; Maïga, 1997; Louppe et al., 1996; Olivier et al., 1996). Chacun de ces auteurs a montré que la production du mil, du sorgho, ou de l'arachide se trouve améliorée sous le couvert d'une légumineuse de la même famille que les espèces étudiées : *Acacia albida*.

L'amélioration de la production de la culture sous le couvert des acacias par rapport aux zones hors couvert résulterait de la meilleure croissance et du bon développement de la culture qui ont été observés sous le couvert. Ce constat confirme ceux de Maïga (1997) au Burkina Faso sur le mil sous *Acacia albida*. Cette amélioration pourrait être due à des conditions microclimatiques et édaphiques plus favorables aux cultures croissant sous le couvert des acacias comme évoqué par Dancette et Niang (1979) et Charreau et Vidal (1965). À partir de travaux réalisés au Sénégal, ces auteurs estiment que l'évaporation connaît une réduction sous le couvert de *Acacia albida*. Dans ce sens, Schoch (1966) montre que sous cette même espèce l'ETP est réduite de 10 % pendant la saison des pluies ; ce qui traduit une réduction des paramètres microclimatiques, et confirme les résultats obtenus dans cette étude.

Cette amélioration de la croissance et du développement de la culture est en partie assurée par la forte activité microbienne notée sous couvert par rapport aux zones découvertes, et qui a été observée aussi par Jung (1967) au Sénégal sous le couvert de *Acacia albida*. Cette importante biomasse microbienne sous les acacias par rapport aux zones hors couvert ne se traduit cependant pas par une augmentation de la teneur en azote minéral du sol. Les faibles teneurs en azote sont peut être dues au lessivage suite aux fortes pluies enregistrées sur ces sols sableux et filtrants, et/ou à la pauvreté du site d'étude en matière organique.

C:ONCLUSION ET PERSPECTIVES

Au terme de cette étude, les résultats obtenus ont permis de montrer que l'influence des légumineuses arborées pérennes (*A. raddiana* et *A. senegal*) est manifeste; et se traduit notamment par :

une amélioration des conditions environnementales caractérisées par une réduction du PAR, et à un degré moindre, du déficit de pression de vapeur donc de l'ETP, sous le houppier des acacias ;

une amélioration de la nutrition hydrique (modification de la dynamique de l'eau, une meilleure disponibilité à la fois en quantité et dans le temps, donc une augmentation de la capacité d'absorption de la culture) ,

une amélioration de l'activité des micro-organismes du sol sous couvert arboré ;

une augmentation de la croissance et du développement dont le corollaire a été une augmentation significative du rendement qui est multiplié par 2,2 pour *A. raddiana* et 1,1 pour *A. senegal* Il ressort, ainsi que par rapport à mil *A. senegal*, *A. raddiana* améliore plus les performances agronomiques du mil.

Même si en valeur absolue le meilleur rendement de 3 12 kg.ha⁻¹ obtenu (sous *A. raddiana*) reste inférieur à la moyenne de 600 kg.ha⁻¹ simulée en milieu paysan dans le département de Diourbel, il faut surtout noter que c'est parce que cette zone a été particulièrement affectée à la fois par le retard des pluies (à partir du 4 août), et la nature des averses qui se sont concentrées dans la 1^{ère} quinzaine du mois d'août, et qui ont été très violentes, Cette situation a certainement favorisé le lessivage des éléments nutritifs et un appauvrissement du sol qui induira un retard de croissance.

Cependant, il faut noter que cette amélioration du rendement sous le couvert arboré a été limité par d'obstacles tels que le houppier des acacias qui a constitué une limite pour le développement des cultures. Il est à noter également que le long des transects (7 et 14 m pour *A. raddiana* puis 8 et 16 m pour *A. senegal*), l'effet améliorateur disparaît puisque les performances enregistrées ne diffèrent pas significativement de celles des témoins absolus ; même si certains paramètres de croissance semblent montrer une discrimination entre ces niveaux d'influence.

D'emblée, il serait intéressant d'étudier, dans le cadre d'un dispositif multi-sites, d'une part ces effets du couvert arboré dans les champs paysans en fonction des espèces, de l'âge des populations et du type de sol et du microclimat, et d'autre part, le fonctionnement hydrique des deux strates pendant le cycle cultural.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Aho A., Daudet F -A Vartanian N., 1980.- Variation de la réserve facilement utilisable en eau du sol en relation avec différents facteurs écologiques. *Ann. agron.*, 31 (2), 109-124.
- Akpo E., Grouzis M., 1997.- Interaction arbre/herbe en zones arides et semi-arides d'Afrique état des Connaissances, 64-78. In : *Les parcs agroforestiers des zones semi-arides d'Afrique de l'Ouest*. Actes du Symposium international tenu à Ouagadougou, Burkina Faso 25-27 octobre, Bonkougou E.G., Ayuk E.T., Zoungrana. 1 éd., 226 p.
- Aliou I., Mermoud A., Vachaud G., 1995.- Techniques culturales et alimentation hydrique en zone soudano-sahélienne. *Cahiers Agricultures* 4, 29-38.
- Aubréville A., 1950 -Les acacias, 250-288. In : *Flore forestière soudano-guinéenne* Société d'Éditions Géographique.
- Badiane N Y , 1998.- Statut organique et microbiologique des sols dans des systèmes agroforestiers et à jachère du Sénégal. Mémoire de D.E.A., I.S.E., Fac. Science et Techniques, UCAD, Dakar, 47 p. + annexes.
- Bâ A , 1997.- Réponses agrophysiologiques et efficacité d'utilisation de l'eau chez le maïs (*Zea mays* L.) var. Synthetic C en conditions de déficit hydrique. Mémoire de fin d'étude, Ecole Nationale des Cadres Ruraux de Bambey, Département Production végétale 44 p
- Berger M , 1996.- Fumure organique : des techniques améliorées pour une agriculture durable *Agriculture et développement* No. hors-série, juin, 37-48. Cours d'agriculture spéciale de troisième année.
- Bernard D., 1986.- La place des arbres forestiers fixateurs d'azote dans l'entretien ou la régénération de la fertilité des milieux tropicaux humides CIRAD-FORET, IDEFOR/DFO, Abidjan, Côte d'Ivoire.
- Bernhard-Reversat F , 1986 -Le recyclage des éléments minéraux par la strate herbacée dans un peuplement naturel à *Acacia* et dans une plantation d'*Eucalyptus* au Sénégal. *Acta Oecol. Gener.*, 7 (49), 353-364.
- Bieler P., 1992.- Agronomic and physiological aspects of postflowering drought tolerance of pearl millet (*Pennisetum glaucum* (L.) R.Br.) in the Sahel. This for the degree of Doctor of Natural Sciences , Swiss Federal Institute of Technology, Zürich (Switzerland), Diss, ETH n° 9791, 103 p
- Bonkougou E.G, Ayuk E.T., Zoungrana I., 1997.- *Les parcs agroforestiers des zones semi-arides d'Afrique de l'Ouest*. Actes du Symposium international tenu à Ouagadougou, Burkina Faso 25-27 octobre, ICRAF, 226 p.
- Charreau C., 1979.- Le rôle des arbres dans les systèmes agraires des régions semi-arides tropicales d'Afrique de l'Ouest, 33-36. In : *Le rôle des arbres au Sahel*. Compte rendu du colloque tenu à Dakar, 5 au 10 novembre, CDRI/IDRC-158, 92 p.
- Charreau C., Vidal P., 1965.- Influence de l' 'Acacia *albida* 'Del. sur le sol, nutrition minérale et rendements des mils *Pennisetum* au Sénégal. *Agronomie tropicale*, 10 (6-7), 600-626.
- Chopart J.L 1980.- Etude au champ des systèmes racinaires des principales cultures pluviales au Sénégal (arachide, mil, sorgho, riz pluvial). Thèse de doctorat, INP, Toulouse, 160 p.
- Cissé L., Vachaud G , 1987.- Une méthode simplifiée d'estimation *in situ* de l'extraction de l'eau par les racines. *Agronomie Tropicale* , 42 (4), 241-247.

- Damagnez J. 1962 - **Conditions d'utilisation de la sonde à mitrons** pour les déterminations d'humidité dans le sol Influence de la densité apparente et de la salure, 7 p
- Dreyfus B.L., Dommergues Y.R., 1981 - Nodulation of *Acacia* species by fast- and slow-growing tropical strains of rhizobium *Appl. Environment. Microbiol.* **31**, 97-99
- Dancette C. 1984 - Contrariétés pédoclimatiques et adaptation à la sécheresse en zone intertropicale In : *La sécheresse en zone intertropicale. Pour une lutte intégrée*, 24, 3
- Dancette C & Poulain, 1968.- Influence de l'*Acacia albida* Del sur les facteurs pédo-biologiques et les rendements des cultures Nouvelle contribution, IRAT, Sénégal, 45 p
- Dancette C & Niang M., 1979.- Rôles de l'arbre et son intégration dans les systèmes agraires du nord du Sénégal, 57-65. In : *Le rôle des arbres au Sahel* Compte rendu du colloque tenu à Dakar., 5 au 10 novembre, CDRI/IDRC- 158f, 92 p.
- de Lajudie P., Neyra M., Dupuy N., Alazard D., Gillis M., Dreyfus B.L., 1991 - Diversité des rhizobium, spécificité de nodulation et aptitude à fixer l'azote chez les Acacias sahéliers, 257-262. In *Physiologie des arbres et arbustes en zones arides et semi-arides*, Groupe d'Etude sur l'Arbre, Paris, 489 p.
- Dicdhiou I., 1994.- Importance des légumineuses dans les systèmes écologiques arides et semi-arides du Sénégal. Mémoire de D.E.A., I.S.E., Fac. Sciences et Techniques: UCAD Dakar, 70 p.
- Diouf M. & Grouzis M., 1996.- Natural distribution of *Acacia tortilis* (Forssk.) Hayne *subsp. raddiana* (Savi) Brenan in Senegal : ecological determinism *International Tree Crops Journal* **9**, 69-75.
- Diouf M., 1993.- L'eau dans le système sol-plante-atmosphère concepts, méthodes d'étude, application à *Acacia tortilis* (Forssk.) Hayne *subsp. raddiana* (Savi) Brenan (Mimosaceae) Mémoire de D.E.A., UCAD, Fac. Sciences et Techniques, UCAD, Dakar, 132 p.
- Diouf M. 1996.- Etude du fonctionnement hydrique et des réponses à l'aridité des ligneux sahéliers Cas de *Acacia tortilis* (Forssk.) Hayne *subsp. raddiana* (Savi) Brenan en zone soudano-sahélienne du Sénégal. Thèse de Doctorat de 3^{ème} cycle, Université Cheikh Anta de Dakar, Faculté des Sciences et Techniques, Département de Biologie Végétale, 172p
- Dufumier M.M., 1994 - Stratégie pour un développement durable des systèmes de production agricole en Afrique sahélienne et soudanienne. Séminaire Régional organisé par la FAO et le CIRAD, Dakar, Sénégal.
- Faure G., 1993.- Stratégies paysannes, politiques agricoles et durabilité des systèmes de production en Afrique soudanienne, 10 p.
- Fotàna A., 1997.- Fiches des principales variétés de mil.
- Fournier Ch., 1995.- Fonctionnement hydrique de six espèces ligneuses coexistant dans une savane sahélienne(Région du Ferlo, Nord-Sénégal), TDM No. 132, ORSTOM, 165 p
- Ganry F., Dommergues Y.R., 1993.- Rôles des fixateurs d'azote dans le maintien de la fertilité azotée des sols. Contribution «Atelier SCOPE», Dakar, Novembre, 15 p.
- Ganry F., Ruiz L., Waneukem V., 1995.- Matière organique et azote, facteurs de production recherche d'indicateur de fertilité azotée des terres. Document provisoire, 8 p
- Giffard P. L., 1966.- Les gommiers : *Acacia senegal* willd., *Acacia laeta* R. Br. *Bois et Forêts des tropiques* **105**, 21-32.

- Gregory P J & Squire G.R . 1979 - Fertilisation effects on roots and Shoots of pearl millet (*Pennisetum typhoides* H & S.). *Expl. Agric.* **15**, 161- 168.
- Guèye M. 1991 - Généralités sur la fixation biologique de l'azote. 12 p In *La fertilité et la biologie des sols sahéliens*, Séminaire 11-22 Nov., RCS, Dakar, Sénégal
- Gupta S C Ndoye A.T., Andrews D.J , 1983.- Essais variétaux sur le mil au Sénégal *Agronomie Tropicale*, **38** (3), 229- 233.
- Hassan I B 1992 - Contribution à l'étude du gommier (*Acacia senegal* (L.) Willd) Sylviculture. phénologie, comportement hydrique Mémoire de fin d'études. Ecole Nationale des Cadres Ruraux de Bambey, Département Forêt, 50 p.
- ICRAF 1995.- L'agroforesterie pour la gestion des ressources naturelles et une production durable dans le Sahel Une stratégie de recherche. ICRAF. Nairobi, Kenya. 27 p
- Jacquinet L 1969.-La nutrition minérale du mil (*Pennisetum typhoides* Stapf et Hubbard) Effet de la nature de l'alimentation azotée sur l'absorption de l'azote et sur la croissance Interaction de l'alimentation en fer *Agronomie tropicale*, **14** (12), 1130-1138
- Jung C 1967 - Influence de l'*Acacia albida* Del sur la biologie des sols "dior". ORSTOM, Dakar, Sénégal
- Jung C , 1986 - Etude de l'influence de l'*Acacia albida* Del. sur les processus microbiologiques dans le sol et sur leurs variations saisonnières. Rapport ORSTOM, Dakar, Sénégal
- Jung G 1970 - variation saisonnières des caractéristiques microbiologiques d'un sol ferrugineux tropical peu lessivé (Dior) soumis ou non à l'influence d'*Acacia albida* Del. *Oecologia Plant.* **5** (2), 113-136.
- Kessler J.J. 1992.- The influence of karité (*Vitellaria paradoxa*) and néré (*Parkia biglobosa*) trees on sorghum production in Burkina Faso. *Agroforestry Systems* **17**, 97-118
- Latir-Souki K , Aubry C., Doré T., Sebillotte M., 1992.- Elaboration du rendement du blé dur en condition semi-aride en Tunisie : relations entre composantes du rendement sous différents régimes de nutrition azotée et hydrique. *Agronomie Tropicale* **12**, 31-43,
- Le Houérou H -N., 1979.- Le rôle des arbres et arbustes dans les pâturages sahéliens, 19-32 In *Le rôle des arbres au Sahel*. Compte rendu du colloque tenu à Dakar, 5 au 10 novembre, CDRI/IDRC-158f, 92 p.
- Le Houérou H -N., 1989.- The grazing land of the African Sahel, *Ecological Studies* **75**, Springer-Verlag, Berlin- Heidelberg, 282 p.
- Leblanc J M , Brizard J.-P., 1993 - Variabilité génétique de l'*Acacia senegal* Etude de deux phénotypes «gris clair et gris foncé. *Bois et Forêts des tropiques* **238**, p. 23.
- Louppe D., Ndour B., Samba S.A.N., 1996.- Influence de *Faidherbia albida* sur l'arachide et le mil Sénégal. Méthodologie de mesure et estimations des effets d'arbres émondés avec ou sans parcage d'animaux, 123-139. In : *Les parcs à Faidherbia*. *Cahier Scientifique* No. 12, CORAF/ORSTOM/CIRAD, CIB, Baillarguet, 312 p.
- Maïga AA., 1997.- Influence du karité, du néré et de *Acacia albida* sur le sorgho et le mil cas de la province du Bazega Burkina Faso, 101-111. In : *Les parcs agroforestiers des zones semi-arides d'Afrique de l'ouest*. Actes du Symposium international tenu à Ouagadougou, Burkina Faso 25-27 octobre, Bonkougou E.G., Ayuk E.T., Zoungrana. I éd., 226 p.

- Gregory P J & Squire G R., 1979.- Irrigation effects on roots and Shoots of pearl millet (*Pennisetum typhoides* H. & S.). *Expl. Agric.* **15**, 161-168.
- Guèye M (1991) - Généralités sur la fixation biologique de l'azote. 12 p In *La fertilité et la biologie des sols sahéliens*, Séminaire 11-22 Nov., RCS, Dakar. Sénégal
- Gupta S C., Ndoye A. F., Andrews D J., 1983 - Essais variétaux sur le mil au Sénégal *Agronomie Tropicale*, **38** (3), 229-233.
- Hassan I.B., 1992.- Contribution à l'étude du gommier (*Acacia senegal* (L.) Willd) Sylviculture, phénologie, comportement hydrique. Mémoire de fin d'études, Ecole Nationale des Cadres Ruraux de Bambey, Département Forêt, 50 p.
- ICRAF, 1995 - L'agroforesterie pour la gestion des ressources naturelles et une production durable dans le Sahel Une stratégie de recherche. ICRAF, Nairobi Kenya. 27 p.
- Jacquinot L., 1969 -La nutrition minérale du mil (*Pennisetum typhoides* Stapf et Hubbard) Effet de la nature de l'alimentation azotée sur l'absorption de l'azote et sur la croissance Interaction de l'alimentation en fer. *Agronomie tropicale*, **14** (12), 1130-1138
- Jung C., 1967 - Influence de l'*Acacia albida* Del, sur la biologie des sols "diors", ORSTOM. Dakar, Sénégal
- Jung C 1986.- Etude de l'influence de l'*Acacia albida* Del. sur les processus microbiologiques dans le sol et sur leurs variations saisonnières. Rapport ORSTOM Dakar. Sénégal.
- Jung G., 1970 - Variation saisonnières des caractéristiques microbiologiques d'un sol ferrugineux tropical peu lessivé (Dior) soumis ou non à l'influence d'*Acacia albida* Del *Oecol. Plant.* **5** (2). 113-136.
- Kessler J J 1992.- The influence of karité (*Vitellaria paradoxa*) and néré (*Parkia biglobosa*) trees on sorghum production in Burkina Faso. *Agroforestry Systems* **17**, 97- 118
- Latiri-Souki K Aubry C., Doré T., Sebillotte M., 1992.- Elaboration du rendement du blé dur en condition semi-aride en Tunisie relations entre composantes du rendement sous différents régimes de nutrition azotée et hydrique. *Agronomie Tropicale* **12**, 31-43
- Le Houérou H -N., 1979.- Le rôle des arbres et arbustes dans les pâturages sahéliens, 19-32 In : *Le rôle des arbres au Sahel*. Compte rendu du colloque tenu à Dakar, 5 au 10 novembre, CDRI/IDRC-158f, 92 p.
- Le Houérou H -N., 1989.- The grazing land of the African Sahel. *Ecological Studies* **75**, Springer-Verlag, Berlin- Heidelberg, 282 p.
- Leblanc J.M Brizard J.-P., 1993.- Variabilité génétique de l'*Acacia senegal* Etude de deux phénotypes «gris clair et gris foncé. *Bois et Forêts des tropiques* **238**, p. 23.
- Loupe D., Ndour B., Samba S.A.N., 1996.- Influence de *Faidherbia albida* sur l'arachide et le mil Sénégal. Méthodologie de mesure et estimations des effets d'arbres émondés avec ou sans parcage d'animaux, 123- 139. In : *Les parcs à Faidherbia*. Cahier Scientifique No.12, CORAF/ORSTOM/CIRAD, CIB, Baillarguet, 312 p.
- Maïga A.A., 1997.- Influence du karité, du néré et de *Acacia albida* sur le sorgho et le mil cas de la province du Bazega Burkina Faso, 101-111. In : *Les parcs agroforestiers des zones semi-arides d'Afrique de l'ouest*. Actes du Symposium international tenu à Ouagadougou, Burkina Faso 25-27 octobre, Bonkougou E.G., Ayuk E.T., Zoungrana. I éd., 226 p.