

Rapports PSS N° 5

Production Soudano-Sahélienne (PSS)
Exploitation optimale des éléments nutritifs en élevage

Projet de coopération scientifique

Structure spatiale du système racinaire de deux arbres du Sahel : *Acacia seyal* et *Sclerocarya birrea*

A. Soumaré¹⁾, J.J.R. Groot²⁾, D. Koné¹⁾ & S. Radersma³⁾

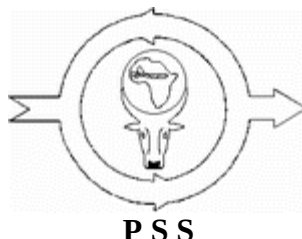
Adresse :

¹⁾ Institut d'Economie Rurale (IER), B.P. 258, Bamako, Mali

²⁾ AB-DLO, B.P. 14, 6700 AA Wageningen, les Pays-Bas

³⁾ Université Agronomique, Dép Agronomie, Haarweg 333, 6709 RZ Wageningen, les Pays-Bas

IER, Bamako
AB-DLO, Wageningen, Haren
DAN-UAW, Wageningen



Rapports PSS N° 5

Wageningen, 1994

Rapports du projet Production Soudano-Sahélienne (PSS)

Numéro 5

Table des matières

- [Résumé](#)
 - [Summary](#)
 - [1 Introduction](#)
 - [2 Matériels et méthodes](#)
 - [2.1 Description du site](#)
 - [2.2 Caractéristiques du sol](#)
 - [2.3 Caractéristiques des arbres](#)
 - [2.4 Inventaire floristique de la strate herbacée](#)
 - [2.5 Description du système racinaire primaire et secondaire](#)
 - [2.6 Description des racines fines](#)
 - [2.7 Présence de rhizobium et de mycorhize](#)
 - [3 Résultats](#)
 - [3.1 Caractéristiques du sol](#)
 - [3.2 Caractéristiques des arbres.](#)
 - [3.3 Inventaire floristique de la strate herbacée](#)
 - [3.4 Description du système racinaire primaire et secondaire](#)
 - [3.5 Description des racines fines](#)
 - [3.6 Présence du rhizobium et de mycorhize](#)
 - [4 Discussion](#)

- [Bibliographie](#)
- [Annexe 1](#)
- [Annexe 2](#)

« The research for this publication was financed by the Netherlands' Minister for Development Co-operation. Citation is encouraged. Short excerpts may be translated and/or reproduced without prior permission, on the condition that the source is indicated. For translation and/or reproduction in whole the Section DST/SO of the aforementioned Minister should be notified in advance (P.O. Box 20061, 2500 EB The Hague). Responsibility for the contents and for the opinions expressed rests solely with the authors; publication does not constitute an endorsement by the Netherlands' Minister for Development Co-operation ».

Résumé

L'étude « Structure spatiale du système racinaire de deux arbres du Sahel : *Acacia seyal* et *Sclerocarya birrea* » avait comme objectif principal de décrire les racines primaires et secondaires (> 2 mm) des deux espèces et de déterminer la distribution des racines fines (< 2 mm) des arbres et des herbacées à différentes distances du tronc. Les objectifs secondaires étaient d'identifier les espèces herbacées inféodées à la zone couverte par le houppier et en plein champ, de déterminer la fertilité du sol sous arbre et hors arbre et de vérifier la présence du rhizobium et de la mycorhize.

La description du système racinaire a montré que l' *Acacia seyal* est caractérisé par une racine pivotante mince et profonde atteignant une profondeur de 6 m ou plus, avec une concentration des racines traçantes dans la couche 0-40 cm du sol. La longueur maximale des racines traçantes égale 25,7 m, ce qui correspond à 7 fois le rayon du houppier. La longueur moyenne des racines traçantes égale 5,6 fois le rayon moyen du houppier. Il existe une corrélation ($r^2 = 0,41$) entre le diamètre des racines traçantes à 10 cm du tronc et sa longueur.

Quant au *Sclerocarya birrea* il a une racine pivotante grosse et courte, pouvant atteindre une profondeur de 2,4 m. Les racines traçantes se ramifient à partir de la racine pivotante entre 0-100 cm de profondeur et remontent vers les couches superficielles en s'éloignant du tronc pour être concentrées dans la couche 0-60 cm. La longueur maximale des racines traçantes de *Sclerocarya birrea* égale 50 m ce qui correspond à 10,2 fois le rayon du houppier. La longueur moyenne des racines traçantes égale 7,4 fois le rayon du houppier. Il existe une corrélation ($r^2 = 0,59$) entre le diamètre des racines traçantes à 10 cm du tronc et sa longueur.

L'étude a montré que la densité des racines fines d'*Acacia seyal* était élevée à la limite du houppier et diminue en s'éloignant du tronc. Par contre, celle de la strate herbacée augmente en s'éloignant de l'arbre. Pour le *Sclerocarya birrea* la plus grande biomasse racinaire a été observée à une distance égale à 2 fois le rayon du houppier. Cependant, à une distance égale à 3 fois le rayon du houppier, on n'observe plus de fines racines de l'arbre. Pour les deux espèces, la biomasse racinaire totale (arbre + strate herbacée) est plus élevée sous arbre que hors de l'arbre. La plupart des racines fines des arbres est localisée en dessous de celles des graminées, ce qui montre qu'il est fort possible que les arbres arrivent à capter les éléments nutritifs qui devraient être lessivés normalement en cas de leur absence.

Les observations ont montré la présence des mycorhizes sur les racines des deux espèces ligneuses, par contre on constate que les nodules sont presque absents sur les racines fines d'*Acacia seyal*, ce qui est probablement liée à l'échantillonnage effectué après l'hivernage.

L'inventaire floristique a montré qu'il existe des espèces herbacées inféodées au houppier et des espèces facultatives et qu'en général il n'y a pas de grande différence entre les espèces herbacées sous le *Sclerocarya birrea* et l'*Acacia seyal*. Ce qui montre qu'il y a surtout un effet « arbre » et non un effet « espèce » sur la composition de la strate herbacée.

Les analyses sur la fertilité du sol sous et hors arbre montrent que la teneur des éléments nutritifs est basse. Malgré le caractère aberrant de certains résultats d'analyses, il a été conclu que les teneurs en matière organique, en phosphore et en CEC sont plus élevées sous arbre que hors de l'arbre.

Summary

The principal objective of the study "Spatial distribution of the root systems of the Sahelian tree species *Acacia seyal* and *Sclerocarya birrea*" was to describe the structural root system (roots >2 mm) of the two species and to determine the distribution of both fine tree roots and fine herbaceous roots (<2 mm) at different distances from the tree-trunk. Secondary objectives were to identify the species composition of the herbaceous layer underneath and outside trees, to determine soil fertility below trees and in the open field and to check for rhizobia and mycorrhiza.

The description of the structural root system showed that *Acacia seyal* is characterized by a thin and deep tap root which may reach 6 m depth ; lateral roots are mainly concentrated in the upper 40 cm of soil. Measured maximum length of *Acacia seyal* roots was 25.7 m, being 7 times crown radius. For the five trees average length of the longest lateral root was 5.6 times the average crown radius. A correlation ($r^2 = 0.41$) was found between diameter of lateral roots measured at 10 cm from the trunk base and total root length. *Sclerocarya birrea* has a thick and relatively short tap root reaching depths of 2.40 m, lateral roots branch at the upper 100 cm of the tap root and gradually curve towards the soil surface to be concentrated in the upper 60 cm of soil. Measured maximum length of *Sclerocarya birrea* roots was 50 m, being 10.2 times crown radius. For the five trees average length of the longest lateral root was 7.4 times average crown radius. A reasonable correlation ($r^2 = 0.59$) was found between lateral root diameter at the trunk base and total root length.

For *Acacia seyal* fine tree roots were concentrated at the crown limit and decreased towards the open field, density of herbaceous roots increased from the crown limit onwards. For *Sclerocarya birrea* highest fine root density was found at 2 times crown diameter, and fine tree roots were absent at 3 root times crown diameter. For both tree species, total fine root weight (herb layer + tree) decreased from the crown limit onwards. The majority of the fine tree roots was found below those of herbaceous plants, indicating that trees might capture nutrients which would have been lost in the absence of trees.

Mycorrhiza was observed on fine roots of both tree species, but nodules were hardly found on *Acacia seyal* roots, presumably the result of sampling after the end of the rainy season.

The composition of the herbaceous layer showed that some species occurred only under the trees and that others were indifferent ; generally little differences in species composition existed between *Acacia seyal* and *Sclerocarya birrea*, indicating that there is mainly a "tree-effect" and not a "tree species effect" on the composition of the herbaceous layer.

Soil fertility analysis showed underneath and outside trees showed very low nutrient levels. In spite of the sometimes contradictory chemical analysis we conclude that soil organic matter, available phosphorus and CEC were higher underneath trees.

1 Introduction

Dans la zone soudano-sahélienne de l'Afrique de l'Ouest, en plus de la faible quantité des précipitations et sa mauvaise répartition dans l'espace et dans le temps, une des contraintes majeures à la production primaire est la faible fertilité des sols ([Penning de Vries & Djitéye, 1982](#) ; Van Keulen & Breman, 1990). L'accroissement démographique a conduit à une situation où l'agriculture extensive ne répond plus aux besoins croissants de la population, et un accroissement de la production ne peut être obtenu que par l'augmentation de la productivité par unité de surface. Dans la zone soudano-sahélienne du Mali l'élevage et l'agriculture utilisent les mêmes ressources naturelles conduisant ainsi à l'instauration d'une forte compétition entre ces deux activités avec pour conséquence une surexploitation de ses ressources. Van der Pol (1992) a signalé que dans cette zone plus de 40% des revenus des paysans provient d'une exploitation abusive de la fertilité du sol. Comme la pauvreté des sols en éléments nutritifs représente le facteur le plus limitatif de la production agro-pastorale dans la zone, l'amélioration de l'utilisation efficace des éléments nutritifs pourrait constituer un élément clé de la durabilité du système de production.

Pour comprendre et mieux soutenir la gestion des ressources naturelles, le Projet Production Soudano-Sahélienne (PSS) s'est fixé un objectif global portant sur l'utilisation optimale de l'azote et du phosphore dans la production fourragère et dans l'alimentation du bétail. Le Projet tente à travers les essais agronomiques fourragers d'approfondir

les connaissances sur la production végétale en liaison avec la disponibilité des éléments nutritifs par rapport à la matière organique dans le sol et par rapport à l'application des engrais chimiques et organiques. Pour une meilleure exploitation des intrants externes, le Projet a donc retenu trois propriétés spécifiques végétales susceptibles de jouer un rôle important dans ce processus. Il s'agit de la capacité fixatrice de l'azote des légumineuses, la pérennité et l'influence positive des ligneux sur la fertilité des sols. Le présent rapport porte sur les activités de recherche du Projet liées à l'étude des ligneux.

Le rôle des arbres dans l'écosystème et dans l'utilisation des terres dans les pays sahéliens est généralement considéré comme positif de part non seulement les produits qu'ils fournissent mais aussi de part son importance dans la lutte anti-érosive, mais aussi que son influence sur la fertilité et l'humidité des sols (Kater *et al.*, 1992; Kessler, 1992; Charreau et Vidal, 1965; Young, 1989). L'influence des arbres sur la fertilité des sols dans les pays sahéliens a fait l'objet de relativement peu de recherche. Cependant nous pouvons émettre l'hypothèse que le rôle de l'arbre sur les éléments nutritifs dans le sol se limite essentiellement à une réduction des pertes de ces éléments par la modification du micro-climat et le maintien d'un taux de matière organique assez élevé. L'ombrage réduit les pertes d'eau par évaporation ce qui augmente le stock en eau, améliore la diffusion des éléments nutritifs dans la rhizosphère (augmentation de l'absorption des éléments nutritifs par les racines) et active les processus de décomposition de la matière organique et sa minéralisation. En plus, l'humidité du sol est généralement plus élevée sous arbre qu'ailleurs, à cause de l'interception des pluies (« stemflow »). La baisse de température sous le houppier de l'arbre a également un effet positif sur la minéralisation. Le maintien d'un taux de matière organique assez élevé sous et autour de l'arbre améliore les caractéristiques physiques (capacité d'infiltration) et chimiques du sol (capacité d'échange des cations). La matière organique fonctionne comme un tampon captant et gardant les éléments nutritifs diminuant ainsi les pertes par le ruissellement, le lessivage et la volatilisation (Belsky *et al.*, 1989 ; [Bremen & Kessler, in press](#)). Le recyclage interne des éléments nutritifs (la translocation des éléments avant la chute des feuilles, le stockage dans les pousses et racines) contribue également à une diminution des pertes, tandis que le recyclage externe (chute des feuilles, fruits, branches) favorise l'accumulation de la matière organique dans le sol, contribuant ainsi à un maintien sinon à une augmentation des éléments nutritifs dans le sol.

Le système racinaire des arbres joue un rôle important dans ce processus de redistribution des éléments nutritifs et de l'eau. Certains arbres ont exceptionnellement des racines profondes cherchant l'eau et les éléments nutritifs en profondeur, c'est le cas de *Prosopis spp* au Chili et *Atriplex halimus* en Afrique du Nord (Le Houérou, 1980), *Leptadenia pyrotechnica* en Egypte (Batanouny & Abdel Wahab, 1973) et *Acacia seyal* au Mali (Penning de Vries, communication personnelle). Par contre, nombreux sont ceux qui ont un système racinaire superficiel étendu. Rutherford (1983) a trouvé que le *Burkea africana* a une concentration de ses racines en surface entre 0,5 et 0,6 m de profondeur et une extension maximale de 20,5 m du tronc. Dans la savane du Ghana, Lawson *et al.* (1968) trouvèrent chez le *Burkea africana* une concentration des racines latérales entre 20 et 40 cm de profondeur. Glevers (1951), sur la base de l'extension latérale des racines des arbres, estima que la couche superficielle du sol est pleinement exploitée en zone semi-aride de la Somalie.

Le rôle des racines dans l'accumulation de matière organique sous l'arbre est mal connu, mais on peut émettre l'hypothèse que la présence d'un système racinaire dense contribue considérablement à l'accumulation de la matière organique dans le sol par sa décomposition (« root turnover »).

Le sol peut être enrichi par la fixation de l'azote atmosphérique; dans la zone soudano-sahélienne l'azote fixé par les ligneuses légumineuses est estimé à environ $0,1 \text{ kg ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ à $0,6 \text{ kg ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ (Kessler & Bremen, 1991). Cependant il a été observé que la disponibilité de l'azote dans la couche superficielle sous les arbres fixateurs de l'azote et non fixateur est similaire (Belsky *et al.*, 1989).

La surface de contact des racines avec le sol peut être élargie par l'infection des fines racines par les mycorhizes, qui jouent un rôle important dans l'absorption de certains éléments nutritifs en particulier le phosphore.

En zone sahélienne la composition floristique et la biomasse produite sont entre autres déterminées par l'intensité et la répartition des pluies, particulièrement par l'intermittence des périodes sèches et humides. Les herbes poussant sous l'arbre connaîtront moins de perturbation pendant la phase germination/installation grâce au micro-climat créé par le houppier.

Pour connaître l'origine des éléments nutritifs et l'eau des arbres (redistribution, profondeur, cycle interne, fixation de l'azote) et des herbacées une description qualitative et quantitative du système racinaire des ligneux et de la strate herbacée sous et hors arbre est nécessaire. Cette description permettra une meilleure évaluation de la production primaire et la compétition entre la strate herbacée et les ligneux pour l'eau et les éléments nutritifs. Très peu de résultats sont disponibles sur la description du système racinaire des ligneux en milieu naturel en zone soudano-sahélienne et cela malgré les multiples tentatives d'introduction des arbres dans les jachères et dans les champs pour la restauration et le maintien de la fertilité des sols.

Dans le cadre de cette étude deux espèces ligneuses ont été choisies: la légumineuse *Acacia seyal* et l'anacardiacee *Sclerocarya birrea*, entre autres pour leur contribution appréciable en tant que fourrage ligneux dans les parcours sahéliens. Dans le delta mort du Niger ces 2 espèces se trouvent généralement sur dunes fossiles aplanies où le travail de déterrage des racines est relativement facile. Le choix du site sur sol profond permet de connaître jusqu'où les racines peuvent aller en profondeur. Pour chaque espèce les caractéristiques physiques et chimiques du sol ont été déterminées sous houppier et en terrain découvert. Pour les deux espèces les observations ont porté sur la composition floristique du tapis herbacé sous houppier et en terrain découvert. L'étude racinaire décrit le système racinaire primaire et secondaire, le rapport entre le diamètre des racines traçantes et sa longueur, et la densité des racines absorbantes des ligneux et de la strate herbacée dans l'horizon 0-60 cm sous arbre et en terrain découvert.

2 Matériels et méthodes

2.1 Description du site

Les études sur le système racinaire de l' *Acacia seyal* et *Sclerocarya birrea* ont été exécutées dans le sud du Sahel (savane tropicale semi-aride) sur les pâturages naturels du « Ranch » de la Station de Recherche Zootechnique (SRZ) de Niono, situé à 15 km de Niono (5deg. 45' E; 14deg. 30' N). Le Ranch a une superficie d'environ 12.000 ha, protégé et exclusivement réservé comme pâturage naturel des animaux du SRZ depuis 1960. Le milieu d'étude fait parti du Delta fossile du fleuve Niger, et est caractérisé par sa platitude relative avec des élévations mineures de dunes d'une hauteur maximale de 10 m. Les sols peuvent être classifiés comme sols bruns rouges sub-arides de transition vers sols ferrugineux. Les sols sont profonds et principalement sablonneux ou sablo-limoneux. L'eau écoulée est distribuée localement et la nappe phréatique est absente. Les sols sont pauvres en matière organique (0,2-0,6% matière organique), le rapport C/N varie entre 30 et 50 ([Penning de Vries & Djitéye, 1982](#)).

Le climat est caractérisé par une saison pluvieuse de 2 à 4 mois entre Juin et Septembre avec une grande variabilité annuelle. Il existe aussi une saison sèche froide, puis chaude entre Octobre et Mai avec une basse humidité relative de l'air. La pluviométrie moyenne annuelle a diminué de 580 mm an⁻¹ pour la période 1950-1978 ([Penning de Vries & Djitéye, 1982](#)) à 460 mm an⁻¹ pour la période 1977-1991 (données de Météorologie Nationale, Station de Niono). Les caractéristiques de la saison des pluies sont les suivantes : début 22 Juin (écart type 19 jours), fin 16 Septembre (écart type 13 jours), durée moyenne 85 jours (écart type 24 jours) (Traoré & Vaksman, 1993). Les températures maximale et minimale en Mai (mois plus chaud) sont 40 deg.C et 23 deg.C, et 27 deg.C et 8 deg.C en Décembre (mois plus froid).

La végétation sur les sols sablonneux du Ranch est de type « savane arbustive » avec comme ligneux prédominants : *Sclerocarya birrea*, *Guiera senegalensis*, *Acacia seyal*, *Acacia senegal*, *Balanites aegyptiaca*, et *Combretum ghasalense* ; les herbacées prédominantes sont *Schoenefeldia gracilis*, *Zornia glochidiata*, *Eragrostis tremula*, *Tribulus terrestris*, *Chloris prierii* et *Cenchrus biflorus*.

2.2 Caractéristiques du sol

L'échantillonnage du sol a été effectué au début de la saison des pluies pour déterminer la teneur du sol en différents éléments nutritifs sous houppier et en terrain découvert autour des arbres. Pour ce échantillonnage, 4 pieds adultes par espèce ont été choisis. Les prélèvements d'échantillons du sol ont été faits à la tarière au niveau des couches 0-20 cm et 20-50 cm suivant les 4 directions cardinales et à 6 distances du tronc : 3 sous arbre (Figure 1, positions e1, e2 et e3)

et 3 hors arbre (Figure 1, positions e4, e5, e6). Les échantillons ont été séchés à la température ambiante. Chaque échantillon a été divisé en deux moitiés. Pour chaque pied et pour chaque couche la moitié des échantillons hors arbre et sous arbre a été mélangée pour obtenir 4 échantillons moyens: hors arbre 0-20 cm, 20-50 cm, sous arbre 0-20 cm, 20-50 cm. Les analyses chimiques ont porté sur le pH, carbone, azote total, phosphore total, phosphore assimilable (P-Bray) et la capacité d'échange des cations (CEC). Les échantillons restants non-mélangés ont été stockés pour d'éventuelles analyses sur le gradient de fertilité.

Pour la granulométrie, les prélèvements de sol ont été effectués au niveaux de 5 pieds par espèce qui ont été choisies pour la description du système racinaire, afin de pouvoir expliquer l'enracinement en fonction de la granulométrie. Les prélèvements ont été effectués à la tarière suivant les 4 directions cardinales à 250 cm du tronc au niveau des couches 0-20 cm, 20-50 cm, 50-100 cm, 100-150 cm et 150-200 cm. Pour chaque couche les échantillons prélevés suivant les 4 directions ont été mélangés.

[Figure 1.](#) Orientation des échantillons de sol pour la détermination de la fertilité sous houppier et en terrain découvert

2.3 Caractéristiques des arbres

Acacia seyal Del.(*Mimosasae*) est un arbre petit à moyen avec une cime en parasol à l'état adulte, typique des régions semi-arides africaines et dispersé à travers tout le Sahel. Ses feuilles et fruits sont appréciés comme fourrage d'une qualité élevée (Von Maydell, 1983). *Acacia seyal* est une espèce vraisemblablement fixatrice (Miettinen *et al.*, 1992). *Sclerocarya birrea* (A.Rich) Hochst. (*Anacardiaceae*) est un arbre à taille moyenne avec une cime bien développée. L'arbre a une large distribution en zone sahélienne. La floraison va de janvier à avril/mai, les fruits ont une valeur énergétique élevée et sont consommés par les petits ruminants et les bovins en fin de saison sèche.

Tous les arbres choisis pendant l'étude du système racinaire étaient des pieds adultes isolés (sans d'autres arbres dans un rayon d'au moins 5 fois le diamètre du houppier) et sur des sols sablonneux profonds. Pour chacune des espèces, 5 pieds ont été choisis. Pour chaque pied les paramètres suivants ont été mesurés:

- 1) la circonférence du tronc, mesurée à 130 cm du sol,
- 2) le diamètre du houppier, mesuré suivant deux directions: Est-Ouest (D1) et Nord-Sud (D2). Le diamètre moyen: $D=(D1+D2)/2$,
- 3) la hauteur de l'arbre, déterminée à partir de la branche la plus haute,
- 4) l'âge de l'arbre, déterminé par la méthode de comptage des cernes après le découpage du tronc à 10-15 cm du sol à l'aide d'une tronçonneuse. Pour faciliter le comptage des cernes la section a été rabotée pour la rendre plus homogène et lisse. Le comptage des cernes a été facilité en frottant la section par un tampon de gasoil pour la rendre plus brillante. La méthode de comptage de cernes, considère que chaque cerne correspond à une saison de croissance. Elle n'est pas très précise parce qu'elle dépend surtout de l'expérience de l'observateur, mais elle permet d'avoir une indication sur l'âge des individus.
- 5) l'état phénologique de l'arbre, décrit au moment de l'étude de la structure du système racinaire. Pour caractériser les différents stades phénologiques on a retenu 3 phases: feuillaison, floraison et fructification et chaque phase est divisée en stades (début, en cours et fin).

2.4 Inventaire floristique de la strate herbacée

Pour l'inventaire floristique de la strate herbacée sous le houppier et en terrain découvert des espèces ligneuses retenues, la méthode d'inventaire systématique a été adoptée à cause de l'exigüité des superficies autour de l'arbre. La superficie inventoriée en terrain découvert était une bande circulaire dont la largeur faisait 2 fois le rayon du houppier. La liste de toutes les espèces rencontrées sous houppier et en terrain découvert a été établie avec des codes d'abondances suivantes: 1 = 5%, 2 = 25%, 3 = 50%, 4 = 75%, 5 = 100%.

2.5 Description du système racinaire primaire et secondaire

Pour les 5 pieds respectifs d'*Acacia seyal* de *Sclerocarya birrea* une fosse de 2 mètres de rayon autour du tronc a été faite en enlevant la terre par couche de 20 cm de profondeur et à l'aide des binettes et des couteaux tout en évitant la destruction des racines. La terre autour des racines a été enlevée en utilisant des brosses de peinture et des brosses de toilette. Dans cette partie de l'étude, les racines avec un diamètre inférieur à 2 mm ont été négligées. L'enlèvement de la terre à l'intérieur de la fosse a été effectué à l'aide des pelles. Pour les couches profondes où le sol était dur il a été utilisé des pics et des pioches et la terre a été enlevée à l'aide de seaux servant de puisette. Après l'arrêt de l'hivernage, une humidification du sol par un apport d'eau a été nécessaire pour éviter la destruction des racines surtout les plus fines. Les racines primaires traçantes qui partent de la racine pivotante ont été numérotées de 1 à n dans chaque quadrant.

La profondeur d'une fosse dépend surtout de la profondeur de l'enracinement de l'arbre. Les paramètres mesurés ont été les suivants:

- la longueur des racines pivotantes ;
- le diamètre des racines traçantes primaires à 10 cm du tronc.

Pour chaque arbre, dans chaque quadrant une racine traçante primaire a été suivie jusqu'à la limite de son enracinement. Le diamètre sur toute la longueur a été déterminé à des intervalles irréguliers, et la longueur totale de la racine primaire traçante était ensuite déterminée.

2.6 Description des racines fines

Pour la strate herbacée l'enracinement d'une espèce donnée n'a pas été étudié, mais plutôt la biomasse racinaire de l'ensemble des espèces sous le houppier et hors houppier. Pour l'étude des racines fines des ligneux et le système racinaire de la strate herbacée la méthode de prélèvement de monolithes a été appliquée en utilisant la planche à épingles ou planche à clous (Schuurman & Goedewaagen, 1971; Böhm, 1979; Van Noordwijk, 1993). Pour cette technique on creuse une fosse de 150 cm de longueur, 120 cm de largeur et 70 cm de profondeur. Puis on nivelle la paroi du profil avec des raclettes. La paroi du profil est toujours orientée face au soleil pour mieux déterminer les différents horizons. Pour pouvoir maintenir les racines en place au cours du lavage du monolithe et dans leur position initiale comme dans le sol, on introduit une grille en plastique (maille de 1 x 2 cm) entre la planche à clous et la paroi du profil. Les clous sont ensuite insérés dans les trous effectués sur la planche au moment du prélèvement à l'aide d'un marteau. L'enfoncement des clous assure la fixation de la planche sur la paroi du profil. Ainsi à l'aide de clous la planche (110 x 60 cm) est divisée en 66 cases de 10 cm x 10 cm. Pour mieux fixer la planche sur la paroi, on utilise un cric. Ensuite on découpe jusqu'à une profondeur de 10 cm d'épaisseur du côté de la largeur de part et d'autre de la planche à clous et 10 cm de terre en dessous, correspondant à l'épaisseur du monolithe. Ensuite on fait passer une bande de carton large de 10 cm tout autour du monolithe et maintenue en place par une bande de tension. Cela permet d'éviter des cassures du monolithe pendant le découpage et le transport. Le monolithe est découpé avec un câble métallique. Après le découpage le monolithe est enveloppé dans une bâche en polypropylène et transporté sous un hangar pour le lavage. Dans un bac de lavage, on enlève la bande de tension et le carton puis on enlève la terre petit à petit et à l'aide d'un couteau jusqu'à la limite du bout des clous. A l'aide d'un jet d'eau de robinet on lave le monolithe pour faire partir la terre. Après le lavage on observe sur fond de tableau noir des racines sur la maille à l'intérieur des différentes cases formées par les clous. Ainsi les racines contenues dans chaque case sont découpées et collectées dans un sachet en plastique contenant de l'eau. Pour chaque couche de 10 cm on a 11 cases et sur une couche de 60 cm on a 66 cases par monolithe prélevé. Chaque plastique devra porter le numéro de la couche et le numéro de la case. Le contenu de chaque sachet est soumis au triage pour séparer les racines des ligneux et celle des herbacées. Les racines fines de ces 2 arbres se distinguent de celles des herbacées par leur coloration: les racines fines de l' *Acacia seyal* sont jaunes, celles du *Sclerocarya birrea* sont rouges sombres et celles des herbacées sont blanches et beaucoup plus claires. Après la détermination du poids frais des racines les échantillons sont mis à l'étuve à 70 deg.C pendant 48 heures pour déterminer le poids sec. La quantité réelle a été calculée en supposant une perte de poids de 35% en moyenne de la biomasse totale au cours de lavage (Grzebisz *et al.*, 1989). Dans le cadre de cette étude la longueur et la densité des racines fines des ligneux et des herbacées n'ont pas été mesurées, mais uniquement la biomasse racinaire.

Pour le prélèvement des monolithes, deux individus adultes par espèce ligneuse ont été choisis. Pour chaque individu 3 monolithes ont été prélevés suivant une seule direction cardinale sur les positions indiqués en Figure 2:

- 1) le premier monolithe à la limite du houppier pour éviter les grosses racines des ligneux qui risquent de détruire le monolithe au moment du découpage ;

- 2) le deuxième monolithe à une distance égale à 2 fois le rayon du houppier ;
- 3) Le troisième monolithe à une distance égale à 3 fois le rayon du houppier.

[Figure 2.](#) Position des monolithes pour la détermination de la distribution des racines fines

2.7 Présence de rhizobium et de mycorhize

La présence de rhizobium et des nodules a été vérifiée sur les racines fines et jeunes de l' *Acacia seyal*. Pour la vérification de la présence de mycorhize, des racines dans les bordures des monolithes ont été prélevées et envoyées à l'Institut de Fertilité des Sols aux Pays-Bas.

3 Résultats

3.1 Caractéristiques du sol

Le Tableau 1 donne les caractéristiques physiques et chimiques du sol. On observe de grandes différences entre les répétitions pour la plupart des caractéristiques, avec des écart types non-acceptables. Mais si l'on considère les résultats d'analyse par arbre et non les valeurs de l'ensemble, les tendances observées sont comparables pour les différents arbres.

pH

Pour toutes les points de prélèvement le pH est bas et varie entre 5,0-5,5. Il est plus élevé pour la couche 20-50 cm. Pour la couche 0-20 cm des 7 arbres, le pH hors arbre est plus élevé que le pH sous-arbre. Cette tendance n'existe pas pour la couche 20-50 cm.

CEC

Elle a été analysée au niveau de chaque arbre séparément; la capacité d'échange des cations ne montre pas une tendance claire entre hors arbre et sous arbre, quoi que la CEC-moyenne sous arbre soit plus élevée pour la couche 20-50 cm et pour la couche 0-20 cm, elle est plus élevée hors arbre. D'une façon générale, la CEC de la couche 20-50 cm est plus élevée que pour la couche 0-20 cm.

C-organique

Pour *Acacia seyal* les teneurs en C-organique sont plus élevées dans la couche 0-20 cm que dans la couche 20-50 cm. Il n'y a pratiquement pas de différence entre les teneurs en C-organique hors et sous arbre pour la couche 0-20 cm, mais pour la couche 20-50 cm, C-organique est plus élevé sous arbre que hors arbre. Pour le *Sclerocarya birrea* les tendances sont comparables avec celle d'*Acacia seyal*.

Phosphore

En général P-total augmente avec la profondeur. Pour *Sclerocarya birrea* dans les deux couches, les teneurs en P-total et P-assimilable sous arbre sont plus élevées que hors arbre. Si P-assimilable est exprimé comme fraction de P-total, P-assimilable sous et hors arbre sont dans les mêmes ordres de grandeur. Pour l'*Acacia seyal*, le P-total n'augmente pas en profondeur, mais sous ce dernier P-assimilable est plus élevé qu'en dehors de l'arbre, ce qui indique que la fraction de P-total assimilable est plus élevée sous arbre. Cette différence entre sous et hors arbre est plus prononcée dans la première couche.

Azote

Sous arbre la teneur en azote semble être plus élevée que hors arbre. Par ailleurs, elle est plus élevée dans la couche 0-20 cm que dans celle de 20-50 cm. D'une façon générale les teneurs en azote sont très faibles et ne permettent pas une interprétation statistique.

Granulométrie

Les arbres sous lesquels la granulométrie a été déterminée ne sont pas les mêmes que ceux pour lesquels les analyses chimiques ont été effectuées. Le Tableau 2 donne la granulométrie sous les arbres qui ont été utilisés pour la recherche

du système racinaire. Sous l'*Acacia seyal* le pourcentage de sable diminue en profondeur, par contre la teneur en argile augmente. Sous le *Sclerocarya birrea* également, il y a une augmentation de l'argile avec la profondeur, les teneurs en sable et limon diminuent.

Saturation des bases

Il n'y a pas de tendances claires pour la saturation des bases. Pour la plupart des analyses la saturation dépasse les 100%, ce qui est théoriquement impossible. Dans ces conditions il est superflus de tirer des conclusions sur les résultats obtenus.

Tableau 1a. Analyses du sol, sous *Acacia seyal*.

		1		2		3		4		moyenne		écart type	
		SA	HA	SA	HA	SA	HA	SA	HA	SA	HA	SA	HA
pH (eau)	0-20	5.10	5.40	5.31	5.40	5.10	5.40	5.21	5.30	5.18	5.38	0.09	0.04
	20-50	5.48	5.21	5.70	5.63	5.04	5.14	5.36	5.12	5.40	5.28	0.24	0.21
pH (KCl)	0-20	4.64	4.48	4.53	4.53	4.33	4.38	4.60	4.20	4.53	4.40	0.12	0.13
	20-50	4.31	4.37	4.20	4.25	4.42	4.32	4.33	4.07	4.32	4.25	0.08	0.11
C organique (g kg ⁻¹)	0-20	0.71	0.50	1.42	1.00	1.88	2.18	0.53	0.95	1.14	1.16	0.54	0.62
	20-50	0.52	0.29	0.13	0.75	0.89	0.45	1.82	0.72	0.84	0.55	0.63	0.19
N total (g kg ⁻¹)	0-20	0.05	0.02	0.02	0.02	0.03	0.02	0.03	0.02	0.03	0.02	0.01	0
	20-50	0.02	0.02	0.02	0.02	0.05	0.02	0.02	0.01	0.03	0.02	0.01	0
P total (ppm)	0-20	57	62	74	68	96	96	130	153	89	95	27	36
	20-50	62	74	85	79	130	141	170	181	112	119	42	45
P assimilable (ppm)	0-20	8.3	3.2	4.6	4.3	8.0	8.0	10.6	5.5	7.9	5.3	2.1	1.8
	20-50	2.0	1.7	2.6	3.5	6.0	3.5	7.8	6.9	4.6	3.9	2.4	1.9
C.E.C.	0-20	2.4	2.7	2.3	2.1	3.2	3.2	3.9	4.1	3.0	3.0	0.6	0.7
	20-50	3.7	3.4	3.2	2.8	5.2	4.3	4.8	4.3	4.2	3.7	0.8	0.6
Na échangeable	0-20	0.04	0.10	-	0.10	0.04	0.04	0.24	0.17	0.08	0.10	0.09	0.05
	20-50	0.60	0.14	-	0.00	0.24	0.04	0.41	0.50	0.31	0.17	0.22	0.20
K échangeable	0-20	0.30	0.20	0.13	0.21	0.56	0.56	0.64	0.39	0.41	0.34	0.20	0.15
	20-50	0.15	0.17	0.30	0.09	0.35	0.13	0.35	0.31	0.29	0.18	0.08	0.08
Ca échangeable	0-20	1.12	1.30	1.03	1.20	1.63	1.63	2.24	2.07	1.51	1.55	0.48	0.34
	20-50	1.30	1.20	1.46	1.20	1.81	1.38	2.07	1.10	1.66	1.22	0.30	0.10
Mg échangeable	0-20	0.33	0.50	0.20	0.30	0.45	0.45	0.70	0.57	0.42	0.46	0.18	0.10
	20-50	0.87	0.82	0.22	0.45	1.25	0.47	0.93	1.01	0.82	0.69	0.37	0.24
Saturation des bases (%)	0-20	75	78	59	86	84	84	98	78	79	81	14	4
	20-50	79	69	62	62	70	47	78	68	72	61	7	9

Tableau 1b. Analyses du sol, sous *Sclerocarya birrea*.

		1		2		3		4		moyenne		écart type	
		SA	HA	SA	HA	SA	HA	SA	HA	SA	HA	SA	HA
pH (eau)	0-20	5.35	5.56	5.28	5.58	5.19	5.49	4.92	5.09	5.19	5.43	0.16	0.20
	20-50	5.56	5.60	5.70	5.64	5.22	5.10	4.78	5.47	5.32	5.45	0.35	0.21

pH (KCl)	0-20	4.96	4.81	4.82	4.47	4.54	4.41	4.21	4.34	4.63	4.51	0.29	0.18
	20-50	4.74	4.24	4.26	4.04	4.19	4.23	3.90	4.18	4.27	4.17	0.30	0.08
C organique (g kg ⁻¹)	0-20	1.05	1.01	0.73	0.89	0.83	1.04	0.94	0.97	0.89	0.98	0.12	0.06
	20-50	0.98	0.93	0.68	0.44	0.72	0.62	1.06	0.45	0.86	0.61	0.16	0.20
N total (g kg ⁻¹)	0-20	0.03	0.02	0.03	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	-	0.01
	20-50	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0	0
P total (ppm)	0-20	85	79	85	57	82	67	108	98	90	75	10	15
	20-50	91	79	72	62	93	82	108	113	91	84	13	18
P assimilable (ppm)	0-20	3.7	3.2	3.7	2.9	4.0	3.6	4.3	3.5	3.93	3.50	0.25	0.52
	20-50	2.9	1.7	2.9	1.7	3.2	3.2	2.3	2.3	2.83	2.23	0.33	0.61
C.E.C.	0-20	3.0	5.3	2.2	3.4	2.4	2.2	3.0	3.2	2.65	3.53	0.36	1.12
	20-50	5.1	2.2	3.0	2.4	4.3	4.0	3.6	4.7	4.00	3.33	0.78	10.6
Na échangeable	0-20	0.19	0.01	0.40	0.19	0.96	0.57	0.15	0.5	0.43	0.32	0.32	0.23
	20-50	0.61	0.64	0.54	0.19	0.36	0.40	0.85	0.12	0.59	0.34	0.18	0.20
K échangeable	0-20	0.27	0.14	0.27	0.17	0.37	0.24	0.22	0.34	0.28	0.22	0.05	0.08
	20-50	0.24	0.17	0.22	0.12	0.37	0.34	0.17	0.19	0.25	0.21	0.07	0.08
Ca échangeable	0-20	1.62	1.36	1.01	1.01	1.71	1.80	1.01	1.71	1.34	1.47	0.33	0.31
	20-50	2.94	1.89	1.36	1.10	1.62	2.06	1.54	1.85	1.87	1.73	0.63	0.37
Mg échangeable	0-20	0.81	0.48	0.36	0.32	0.45	0.49	0.27	0.95	0.47	0.56	0.20	0.24
	20-50	1.50	1.37	0.73	0.70	0.84	0.97	0.85	1.24	0.98	1.07	0.30	0.26
Saturation des bases (%)	0-20	96	38	93	50	145	141	55	55	97	71	32	41
	20-50			95	88	74	94	95	72	66	64	39	38

Tableau 2. Analyses granulométriques du sol

[illegible]

1	82.1	76.2	79.9	84.0	81.4	8.6	12.7	8.3	6.0	9.7	9.3	11.1	11.8	10.0	8.8
2	85.1	82.7	83.7	85.7	86.2	6.3	5.1	5.8	6.7	4.2	8.6	12.2	10.4	7.6	9.6
3	82.7	82.2	82.9	87.0	80.5	8.7	5.3	6.4	5.0	7.5	8.6	12.5	10.7	7.9	12.0
4	87.8	84.8	83.8	84.1	84.5	6.2	6.1	6.5	6.5	6.0	5.9	9.2	9.6	9.4	9.4
5	82.2	79.3	79.4	79.4	79.4	10.9	8.2	7.7	7.1	8.5	6.9	12.4	12.9	13.5	12.0
moy.	84.0	81.0	81.9	84.1	82.4	8.1	8.7	6.9	6.3	7.2	7.2	11.5	11.1	9.7	10.7

3.2 Caractéristiques des arbres.

Des principales caractéristiques des arbres ont été déterminées à partir de mensurations effectuées sur la hauteur, le diamètre moyen du houppier, le diamètre du tronc (circonférence mesurée à 130 cm / [pi]), l'âge des arbres, la longueur de la racine pivotante et la longueur maximale des racines traçantes primaires. Ces données sont mentionnées dans le Tableau 3.

Tableau 3. Caractéristiques des arbres

	Acacia seyal					Sclerocarya birrea				
Caractéristiques	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Hauteur (m)	6.0	5.5	6.4	5.7	4.4	6.9	8.2	8.7	8.4	7.1
Diamètre houppier (m)	7.2	9.3	6.5	8.9	8.1	12.5	8.1	8.5	9.8	8.1
diamètre du tronc (m)	0.13	0.15	0.10	0.12	0.12	0.45	0.28	0.33	0.26	0.28
Age des arbres (an)	9	14-15	12	12-13	8-9	32	11-12	29	25	19-20
Longueur racine pivotante (m)	-	5.5	5.0	6.0	5.0	2.4	2.4	1.6	2.0	2.4
Longueur maximale des racines latérales (m)	25.7	19.9	20.8	23.2	22.5	46.0	33.3	31.8	50.0	13.4
Stade phénologique:										
feuillaison	+	+		+	+	+				+
floraison					+					
chute des feuilles			+				++	++	++	

(+) en cours

(++) début

Acacia seyal

Chez l'espèce, la hauteur des individus varie entre 4,4 m et 6,4 m. Les diamètres du houppier ont été mesurés suivant 2 directions Est-Ouest et Nord-Sud. Le diamètre moyen observé varie entre 6,5 m et 9,3 m et celui du tronc entre 0,10 et 0,15 m. La longueur de la racine pivotante varie entre 5 et 6 m; cette longueur ne représente pas la totalité de la racine pivotante car la dureté du sol n'a pas permis d'atteindre la limite extrême de l'enracinement. On peut émettre l'hypothèse que les racines pivotantes ne descendent pas au delà de 6 m plus profondément, car la résistance de la couche gravillonnaire est telle que les racines ne peuvent pas y pénétrer. La longueur maximale des racines primaires traçantes varie entre 20,8 et 25,7 m et l'âge des individus varie de 9 à 15 ans.

Sclerocarya birrea

Chez cette espèce la hauteur des individus varie entre 6,9 et 8,7 m, le diamètre du houppier varie entre 8,1 et 12,5 m et celui du tronc entre 0,26 m et 0,45 m. La longueur de la racine pivotante varie entre 1,6 m et 2,4 m, la longueur

maximale des racines traçantes latérales varie entre 13,4 et 50 m. L'âge des individus varie entre 12 et 32 ans.

Le changement de stade phénologique des individus des 2 espèces au moment de l'expérience s'explique par l'échelonnement des travaux du système racinaire. Ainsi les individus étudiés entre le mois d'Août et le mois d'Octobre étaient en feuillaison (S1, S5, A1, A2, A4, A5) tandis que ceux étudiés en fin octobre et novembre montraient soit le début de chute de feuilles soit la chute des feuilles en cours (A3, S2, S3, S4). Le stade début floraison a été observé chez l'*Acacia seyal* A5 étudiés en septembre.

3.3 Inventaire floristique de la strate herbacée

Le Tableau 4 présente la composition floristique de la strate herbacée. L'inventaire floristique montre qu'il y a des espèces herbacées inféodées au houppier et des espèces facultatives. Les espèces associées exclusivement au couvert ligneux ne représentent qu'une minorité. D'une façon générale on rencontre les mêmes espèces sous *Sclerocarya birrea* et *Acacia seyal*.

3.4 Description du système racinaire primaire et secondaire

Acacia seyal

Le Tableau 3 présente la longueur de la racine pivotante et celle de la racine traçante la plus longue. A l'exception d'un pied de *Acacia seyal* (pied n° 1, voir Tableau 3), la racine pivotante descend verticalement en profondeur pour atteindre 5 à 6 m et même plus. Dans notre étude la racine pivotante n'a pas pu être déterrée entièrement au delà de 6 m, à cause de la dureté du sol en profondeur (mélange argile-gravillon) et l'effritement prononcé de la racine pivotante lorsque l'on atteint de grandes profondeurs. Malgré le fait que ces racines n'ont pas été déterrée jusqu'à leur limite extrême, nous estimons que la résistance physique de cette couche dure gravillonnaire ne permettait pas une pénétration plus profonde de ces racines. Pour l'*Acacia seyal* n° 1, la racine pivotante était déjà pourrie et la plupart des racines secondaires se trouvait à 1,5 m autour du tronc et était orientée verticalement en forme d'échasses. Ces racines semblaient se substituer à la racine pivotante. Pour les autres pieds il a été observé que la racine pivotante se divise au moins en 2 branches entre 1,5 et 3,0 m de profondeur, et que les ramifications sont toujours orientées verticalement. L'observation des racines pivotantes n'a pas permis de déceler la présence des poils absorbants, mais cela pourrait être dû à une destruction de ceux-ci par la technique utilisée, qui ne permettait pas la détermination des racines fines.

Tableau 4: Composition floristique de la strate herbacée

Espèces indifférentes	Espèces sous houppier	Espèces hors houppier
<i>Acacia seyal</i>		
<i>Zornia glochidiata</i> 3 <i>Schoenefeldia gracilis</i> 1 <i>Cenchrus biflorus</i> 1 <i>Eragrostis tremula</i> 1 <i>Limeum pterocarpum</i> <i>Dactyloctenium aegyptium</i> <i>Cenchrus prieurii</i> <i>Aristida mutabilis</i> <i>Maerua crassifolia</i> (A) <i>Indigofera astragalina</i> (A) <i>Cassia tora</i> (A)	<i>Brachiaria ramosa</i> <i>Achyranthes argentea</i> <i>Portulaca foliosa</i> <i>Chloris pilosa</i> (A) <i>Commelina forskalaei</i> (A)	<i>Waltheria indica</i> <i>Borreria radiata</i> <i>Corchorus tridens</i> <i>Alysicarpus ovalifolius</i> <i>Brachiaria distichophylla</i> (A) <i>Cassia mimosoides</i> (A)
<i>Sclerocarya birrea</i>		
<i>Zornia glochidiata</i> <i>Schoenefeldia gracilis</i> <i>Cenchrus biflorus</i> <i>Eragrostis tremula</i> <i>Limeum pterocarpum</i>	<i>Brachiaria ramosa</i> <i>Achyranthes argentea</i> <i>Portulaca foliosa</i> <i>Digitaria ciliaris</i> (S)	<i>Waltheria indica</i> <i>Borreria radiata</i> <i>Corchorus tridens</i> <i>Alysicarpus ovalifolius</i>

<i>Dactyloctenium aegyptium</i>		
<i>Cenchrus prieurii</i>		
<i>Aristida mutabilis</i>		
<i>Chloris prieurii</i> (S)		
<i>Ipomaea coscosperma</i> (S)		
<i>Tribulis terrestris</i> (S)		
<i>Mollugo nudicaulis</i> (S)		

Abondances: 1 = 5%, 2 = 25%, 3 = 50%, 4 = 75%, 5 = 100%

(A) trouvé uniquement en association avec *Acacia seyal*

(S) trouvé uniquement en association avec *Sclerocarya birrea*

La Figure 3a donne la distribution du système racinaire comme observé dans la fosse pour *Acacia seyal* n° 4. La plupart des racines traçantes latérales est concentrée entre 0-40 cm de profondeur. A partir des racines traçantes primaires, plusieurs racines secondaires sont orientées verticalement et peuvent atteindre une profondeur de 5 m ou plus. L'existence de cette « sinker-roots » n'a pas été étudiée en détail mais nous avons observé qu'elles partent près du tronc.

[Figure 3](#). Distribution des racines primaires et secondaires dans la fosse racinaire pour *Acacia seyal* (a) et *Sclerocarya birrea* (b)

[Figure 4](#). Diamètre des racines déterminé à différentes distances du tronc pour une racine traçante d'*Acacia seyal* et une racine traçante de *Sclerocarya birrea*. Les points indiqués avec une flash ont été exclus d'analyse de régression.

[Figure 5](#). Relation entre le diamètre des racines traçantes mesuré à 10 cm du tronc et leur longueur totale pour *Acacia seyal* et *Sclerocarya birrea*

Pour toutes les racines traçantes au niveau de chaque pied le diamètre a été mesuré à environ 10 cm de la base du tronc. Le nombre des racines primaires traçantes varie entre 16 et 28 par pied chez *Acacia seyal* et leurs diamètres varie entre 0,7 et 8,9 cm. Le diamètre des racines traçantes déterminé à différentes distances du tronc sur toute la longueur des racines peut bien être décrit par une équation exponentielle négative ($D_L = D_0 e^{-kL}$, avec D_0 le diamètre à 10 cm de la base du tronc et L la distance du tronc voir [Figure 4](#)). Pour chaque arbre la longueur d'une racine traçante a été déterminée au niveau de tous les quadrants. Dans la [Figure 5](#) les 12 racines étudiées sont celles qui ont pu être dégagées jusqu'à la limite extrême, car la plupart d'entre elles s'arrêtait brusquement par suite de pourriture. On peut conclure qu'il existe une faible corrélation entre le diamètre à 10 cm du tronc et la longueur des racines traçantes ($r^2 = 0,41$, voir [Figure 5](#)).

Sclerocarya birrea : La [Figure 3b](#) montre une coupe verticale du système racinaire dans un rayon de 2m autour du tronc chez *Sclerocarya birrea* n° 1. Les racines pivotantes sont grosses et courtes et descendent verticalement en profondeur pour atteindre entre 1,6 à 2,4 m, avec quelques ramifications vers la fin. La plupart des racines traçantes partent de la racine pivotante entre 0-100 cm de profondeur et remonte vers la couche superficielle en s'éloignant du tronc, pour se concentrer dans la couche 0-60 cm. Les ramifications verticales des racines traçantes (« sinker-roots ») comme observé chez *Acacia seyal*, sont absentes. Le nombre des racines traçantes est seulement 15 pour le pied le plus jeune et atteint 46 pour le pied le plus âgé. Le diamètre des racines traçantes déterminé à environ 10 cm de la base du tronc varie entre 0,51 et 23,4 cm. En faisant la comparaison avec *Acacia seyal*, les racines traçantes sont plus grosses à la base du tronc, mais leur diamètre diminue rapidement après (voir [Figure 4](#)). A partir d'une distance d'approximativement 100 cm de la racine pivotante le diamètre des racines traçantes, déterminé à différentes distances du tronc peut bien être décrit par une équation négative exponentielle, mais les coefficients de régression varient considérablement entre les différentes racines traçantes. Sur la base de 16 observations de la longueur des racines traçantes, il existe une corrélation satisfaisante ($r^2 = 0,59$) entre le diamètre déterminé à 10 cm du tronc et la longueur finale ([Figure 5](#)).

3.5 Description des racines fines

Le Tableau 5 donne la biomasse racinaire par couche de 10 cm pour les trois positions ([Figure 2](#)) et pour les deux pieds par espèce. Dans la détermination du poids par couche, les quantités mesurées ont été corrigées pour la perte du poids au cours du lavage et le stockage des racines; suivant Grzebisz *et al.* (1989) cette perte peut être estimée à 35%. Pour quelques échantillons racinaires une erreur a été faite pendant le lavage et le séchage: quelques grosses racines des ligneux (> 2 mm) n'ont pas été enlevées, ce qui donne des fois des valeurs aberrantes et trop élevées. Ces valeurs aberrantes ont été corrigées et indiquées avec un astérisque (*). Les données de base pour le Tableau 5 (la distribution du poids sec par monolithe) sont montrées en [annexe 2](#). Dans cette [annexe](#) les erreurs ont été indiquées et corrigées. Les deux pieds d'*Acacia seyal* et de *Sclerocarya birrea* sont d'une taille comparable. Les poids moyens ainsi obtenus permettent de construire la [Figure 6](#).

Tableau 5. Poids des racines de la strate herbacée et de l'arbre par couche de 10 cm pour les différentes positions de prélèvement

	Acacia seyal 1						Acacia seyal 2					
	position 1		position 2		position 3		position 1		position 2		position 3	
	herbe	arbre	herbe	arbre	herbe	arbre	herbe	arbre	herbe	arbre	herbe	arbre
0-10	27	59	39	7	95	0	3	11	7	11	56	4
10-20	15	214	29	117	13	0	0	78	3	49	3	66
20-30	6	309	21	81	6	113	0	284	0	283	8	122
30-40	0	161	13	10	0	4	0	145	6	78	0	0
40-50	0	13	3	14	0	7	10	17	0	6	0	0
50-60	0	11	31	38	1	6	0	53	0	0	0	0
Total	48	766	136	267	115	130	13	589	15	427	67	192
	Sclerocarya birrea 1						Sclerocarya birrea 2					
0-10	225	4	73	199	103	0	130	24	24	8	76	0
10-20	36	21	24	126	57	0	162	28	18	10	74	0
20-30	36	0	32	14	53	0	88	28	24	17	67	0
30-40	32	4	13	6	34	0	29	32	15	24	39	0
40-50	49	8	0	0	18	0	25	42	3	0	25	0
50-60	0	7	4	0	62	0	4	21	11	0	4	0
Total	379	45	145	344	327	0	439	175	95	59	285	0

Acacia seyal

A la limite du houppier (position 1, voir [Figure 2](#)) la biomasse des racines fines de l'arbre augmente avec la profondeur, jusque dans la couche 20-30 cm, et ensuite diminue ([Figure 6a](#)). La présence d'une quantité des racines de l'arbre relativement élevée suggère qu'il y a aussi des racines fines de l'arbre au delà de 60 cm de profondeur. La quantité totale des racines fines d'*Acacia seyal*, exprimée en kg ha⁻¹, est de 678 kg ha⁻¹. La biomasse racinaire de la strate herbacée diminue avec la profondeur, mais en absence d'une strate herbacée abondante la biomasse racinaire n'est seulement 30 kg ha⁻¹. Malheureusement, la production aérienne de la strate herbacée n'a pas été mesurée. La biomasse racinaire totale (arbre + strate herbacée) à la position 1 est 708 kg ha⁻¹ . A la position 2 (2 fois le rayon du houppier), la distribution des racines fines de l'arbre est comparable avec la position 1, mais la quantité totale des racines fines de l'arbre est plus basse. Aussi pour la strate herbacée la distribution des racines est comparable avec la position 1, à l'exception d'une concentration des racines fines dans la couche 50-60 cm. La production totale (arbre + strate herbacée) est 423 kg ha⁻¹. A la position 3 (3 fois le rayon de l'houpier) la concentration des racines fines de l'arbre est la plus élevée dans la couche 20-30 cm. En dessous de 30 cm, les racines fines de l'arbre sont pratiquement absentes. En comparaison avec la position 2, la densité des racines fines de la strate herbacée est plus élevée, et les

racines se trouvent concentrées dans la couche 0-10 cm.

[Figure 6](#). Distribution des racines fines, à partir des positions indiquées en [Figure 2](#) pour *Acacia seyal* (a) et *Sclerocarya birrea* (b)

Sclerocarya birrea

A la limite du houppier (position 1), la distribution des racines fines de *Sclerocarya birrea* est presque homogène, et la présence d'une quantité relativement élevée des racines fines dans les couches 40-50 et 50-60 cm suggère qu'il y a aussi des racines de *Sclerocarya birrea* au delà de 60 cm de profondeur. Pour l'arbre, la biomasse racinaire totale (0-60 cm) est de 110 kg ha^{-1} . La biomasse racinaire de la strate herbacée diminue d'une façon exponentiellement négative avec la profondeur et la biomasse racinaire totale dans la couche (0-60 cm) est de 40 g ha^{-1} . L'ensemble de la biomasse racinaire (arbre + strate herbacée) est égale à 519 kg ha^{-1} . A la position 2, la biomasse racinaire de l'arbre est plus élevée qu'à la limite du houppier (201 kg ha^{-1}), et la plupart des racines se trouvent concentrées dans les couches superficielles. La biomasse racinaire de la strate herbacée diminue avec la profondeur, mais la biomasse racinaire totale (0-60 cm) est moins qu'à la limite du houppier (120 et 409 kg ha^{-1}). L'ensemble de la biomasse racinaire (arbre + strate herbacée) à la position 2 est égale à 321 kg ha^{-1} . A la position 3, les racines de l'arbre sont absentes, et la biomasse racinaire de la strate herbacée est égale à 306 kg ha^{-1} .

3.6 Présence du rhizobium et de mycorhize

Présence du rhizobium

Pour les deux pieds d'*Acacia seyal* sur lesquels les monolithes ont été prélevés, la présence des nodules a été observée sur un seul pied. Seulement 5 nodules en phase de résorption ont été trouvées sur les racines fines dans les couches 20-30 à une distance du tronc égale à 2 fois le rayon du houppier (position 2).

Présence du mycorhize

La vérification de la présence de mycorhize a été faite à l'Institut de Fertilité des Sols aux Pays-Bas. La méthode utilisée n'est pas quantitative et permet seulement de se prononcer sur la présence ou l'absence de mycorhize. Suivant F. Meijboom (communication personnelle) tous les échantillons racinaires des ligneux contenaient des mycorhizes.

4 Discussion

Caractéristiques du sol

Le Tableau 1 montre qu'il y a une grande variation entre les valeurs de la saturation des bases obtenues, et dans la plupart des cas la saturation dépasse la valeur théorique maximale de 100%. Etant donné que la CEC est très basse (dans l'ordre de $3 \text{ méq } 100 \text{ g}^{-1}$), il est difficile d'analyser les différentes bases de façon très précise, car on atteint la limite de détection des analyses. Il n'est pas exclu que les fluctuations et les valeurs supérieures à 100% constituent des erreurs dans les résultats d'analyses.

La CEC du sol est surtout déterminée par la teneur en matière organique et la teneur en argile, en supposant que les oxydes de fer et d'alumine ne jouent pas un rôle important dans les sols de la zone d'étude. La CEC de la matière organique est dans l'ordre de $250\text{-}300 \text{ méq } 100 \text{ g}^{-1}$ (Veldkamp *et al.*, 1991 ; Janssen, 1983), cela veut dire que chaque pourcent de la matière organique contribue pour près de $2,5\text{-}3,0 \text{ méq } 100 \text{ g}^{-1}$ à la CEC. Etant donné que les teneurs en matière organique (calculées comme pourcentage C-organique/0,58) varient entre 0,1 et 0,2%, la contribution de la matière organique à la CEC varie entre 0,3 et 0,6 $\text{méq } 100 \text{ g}^{-1}$. Les valeurs de la CEC (Tableau 1) varient entre 2 et 5 $\text{méq } 100 \text{ g}^{-1}$, indiquant que la matière organique n'est pas d'une grande importance dans la détermination de la CEC.

Une analyse des minéraux argileux du Ranch de Niono montre que pour les argiles du Ranch la kaolinite est dominante et il y a des niveaux de illite très bas (Stroosnijder, 1982). Suivant Sanchez (1976) la CEC du kaolinite varie entre 3 et 15 $\text{méq } 100 \text{ g}^{-1}$ et pour l'illite entre 10 et 40 $\text{méq } 100 \text{ g}^{-1}$. Pour les sols de l'étude la teneur en argile augmente avec la

profondeur (Tableau 2), ce qui explique les valeurs plus élevées de la CEC pour la couche 20-50 cm.

La saturation des bases ne permet pas d'interpréter les données, et la différence entre pH-eau et pH-KCl ([Delta]pH) a été analysé. La valeur [Delta]pH est une indication pour la saturation relative de H⁺ à la capacité d'échange. Avec une augmentation de H⁺ absorbé à la CEC on trouve une augmentation de [Delta]pH. Si [Delta]pH augmente, soit la saturation des bases baisse sans un changement du CEC, soit la CEC augmente sans un changement de saturation des bases. Pour tous les arbres [Delta]pH est plus bas pour la couche 0-20 cm; cela est expliqué par la différence de la CEC entre les deux couches. Par conséquent, il n'existe pas une grande différence entre la saturation des bases des deux couches. La différence de [Delta]pH entre les couches hors arbre est moins grande que sous arbre, suivant la plus grande différence en CEC sous arbre que hors arbre.

Le fait que la CEC dans les couches 0-20 cm est plus élevée que dans les couches 20-50 cm et que la différence entre les deux couches est plus prononcée sous arbre que hors arbre peut être expliqué par l'hypothèse suivante: Sur la base de la littérature (Young, 1989 ; [Bremann & Kessler, in press](#)) on suppose que la capacité d'infiltration augmente sous l'arbre et les particules argileuses sont lessivées plus facilement sous l'arbre que hors arbre (Figure 7). L'augmentation de la CEC avec la profondeur peut être liée à une accumulation du matériel argileux dans la couche 20-50 cm, et cette accumulation peut être importante sous arbre suite à une meilleure capacité d'infiltration. Malheureusement des analyses granulométriques sous et hors arbre n'ont pas été effectuées.

[Figure 7.](#) Lessivage et déposition des particules argileuses pour les différentes couches du sol

L'augmentation de la teneur en phosphore avec la profondeur peut être liée à l'augmentation de la teneur en argile, fonctionnant comme source de P par l'effritement. Il y a plusieurs explications possible pour la teneur de P plus élevé sous *Sclerocarya birrea* :

- la teneur en argile sous arbre est plus élevée que hors arbre (voir Figure 7) ;
- le sol sous l'arbre est plus effrité, ce qui est occasionné par une durée d'humectation plus longue sous l'arbre (changement du micro-climat, voir Belsky *et al.*, 1989) ;
- sous arbre il y a un apport de P lié à la redistribution par les racines. Sous *Acacia seyal* la fraction de P-assimilable du P-total est plus élevée sous arbre. Dans la littérature il a été documenté que des racines des légumineuses des régions semi-arides peuvent faire baisser le pH, tout en augmentant la solubilité de Ca₁₀(PO₄)₆.(OH)₂ (Marschner, 1991).

Les teneurs en azote sont très basses (dans l'ordre de 0,02 à 0,03 g kg⁻¹, Tableau 2). La précision d'analyse de l'azote est 0,01 g kg⁻¹, ce qui implique qu'il est presque impossible de tirer des conclusions.

Concernant le C-organique dans la couche 0-20 cm il n'y a pas une différence nette entre hors et sous arbre, mais dans la couche 20-50 cm la quantité de C-organique est plus élevée sous arbre. Suivant [Figure 6](#) chez *Acacia seyal* la densité des racines fines est plus élevée sous arbre dans la couche 20-50 cm et cette densité diminue en s'éloignant de l'arbre. La contribution de la matière organique issue des racines dans les échantillons de sol est trop petite pour expliquer la teneur en matière organique plus élevée sous arbre dans la couche 20-50 cm, mais on peut supposer que pendant la croissance des arbres, la décomposition des racines fines a contribué à l'accumulation de la matière organique. Il est possible que la contribution des feuilles, branches et fruits tombés et décomposés, et leur incorporation dans le sol par des termites a contribué à l'accumulation de la matière organique, mais sur la base de nos données cette hypothèse ne peut pas être vérifiée.

Inventaire floristique de la strate herbacée

L'inventaire floristique montre qu'il y a des espèces herbacées inféodées au houppier et des espèces facultatives (Tableau 4). En général il n'y a pas de grande différence entre les espèces inventoriées sous le *Sclerocarya birrea* et l'*Acacia seyal*. Des résultats similaires ont été obtenus par Grouzis *et al.* (1990) au Sénégal. Suivant ces auteurs il y a surtout un effet « arbre » et non un effet « espèce », et les légères variations de la composition floristique dans leur étude seraient liées à la topographie et à la distribution des arbres dans l'espace.

Belsky *et al.* (1989) trouvaient que *Acacia tortilis* et *Adansonia digitata* ont des effets similaires sur l'environnement et cela a été illustré dans la composition floristique sous leur houppier qui était largement dominé par le *Cynodon lemfuensis* et le *Panicum maximum*. Nos études confirment ces observations, la plupart des espèces sous houppier est la même pour les deux espèces. Le fait que dans notre étude il y a des différences entre les espèces indifférentes et les

espèces hors houppier peut être lié à la topographie du terrain.

Système racinaire

Les données sur le système racinaire primaire et secondaire, et la distribution des racines fines montrent qu'il y a des différences considérables entre les deux espèces.

L'*Acacia seyal* est caractérisé par une racine pivotante mince et profonde atteignant plus de 6 m de profondeur, avec une concentration des racines traçantes dans la couche 0-40 cm du sol. Le diamètre des racines traçantes diminue graduellement avec la longueur et il y a des racines secondaires se ramifiant verticalement des racines latérales dans un rayon de 2 m du tronc et atteignant une profondeur de 5 m ou plus (« sinker-roots »). La longueur maximale des racines traçantes d'*Acacia seyal* est égale à 25,7 m, correspondant à 7 fois le rayon du houppier. Une régression négative exponentielle décrit bien le diamètre des racines traçantes en fonction de la distance du tronc, mais les coefficients de régression varient considérablement pour les différentes racines traçantes. Par contre, Rutherford (1983) a trouvé une équation avec des coefficients de régression unique pour toutes les racines traçantes, et une meilleure corrélation entre le diamètre à la base du tronc et la longueur des racines.

Le *Sclerocarya birrea* a une racine pivotante grosse et courte, atteignant 2,4 m de profondeur. Les racines traçantes se ramifient sur les premiers 100 cm de la racine pivotante et remontent vers les couches superficielles en s'éloignant du tronc. Les racines traçantes de *Sclerocarya birrea* sont grosses à la base du tronc (voir [Figure 3b](#)), mais leur diamètre diminue rapidement dans un rayon de 2 m du tronc. A partir d'une distance d'approximativement 100 cm de la racine pivotante le diamètre des racines traçantes, déterminé à différentes distances du tronc peut être décrit par une équation négative exponentielle, « sinker-roots » ce qui n'a pas été observé sur *Sclerocarya birrea*. La longueur maximale des racines traçantes est égale à 50 m correspondant à 10,2 fois le rayon du houppier.

Pour chaque arbre étudié 4 racines traçantes ont été déterrées pour la détermination de la longueur et il n'est pas exclu qu'il ait des racines traçantes encore plus longues. Pour les 5 arbres d'*Acacia seyal* étudiés, la longueur moyenne de la racine traçante la plus longue est égale à 5,6 fois le rayon moyen du houppier. Pour les 5 pieds de *Sclerocarya birrea*, la longueur moyenne de la racine traçante la plus longue est égale à 7,4 fois le rayon moyen du houppier. Un système racinaire comparable, c'est-à-dire superficiel et dense avec une concentration des racines latérales dans les premiers 50 cm du sol et des « sinker-roots » et un rapport entre longueur des racines latérales/diamètre du houppier entre 6 à 7 ont également été trouvés chez l'*Ochna pulchra* (Rutherford *et al.*, 1983) et le *Burkea africana* (Lawson *et al.*, 1968).

[Bremen et Kessler \(in press\)](#) distinguent 3 types des systèmes racinaires:

- i. avec pénétration profonde des racines pivotantes et peu des racines traçantes ;
- ii. avec pénétration profonde des racines pivotantes et beaucoup des racines traçantes et
- iii. avec absence des racines pivotantes profondes et avec racines traçantes longues et denses.

Leur compilation de données sur les systèmes racinaires des ligneux dans la zone soudano-sahélienne montre qu'en général les arbres sont classifiés comme type ii et type iii. Nos données montrent que le système racinaire d'*Acacia seyal* est du type ii et *Sclerocarya birrea* du type iii.

Sur la base de nos données on peut conclure que l' *Acacia seyal* a la capacité d'absorber des ressources dans les couches profonde du sol. Pour les racines pivotantes il a été possible de les suivre jusqu'à une profondeur de 6 m, chaque fois que l'humidité du sol était suffisante. Il a été observé pour les sols sablonneux profonds du Ranch de Niono que l'eau de pluie s'infiltre jusqu'à approximativement 140 cm (Stroosnijder & Koné, 1982). Cela montre que le ruissellement de l'eau de pluies par le tronc peut jouer un rôle important dans le processus de l'infiltration de l'eau sous arbre ([Bremen & Kessler, in press](#)). Certaines études ont montré que l'eau qui ruisselle par le tronc peut contenir des éléments nutritifs originaires de la déposition de la poussière sur l'arbre ou originaire du lessivage des feuilles sénescents. Ce processus peut conduire à une augmentation de la disponibilité des éléments nutritifs sous l'arbre. Par ailleurs il est possible que la différence entre la forme de racine pivotante de l'*Acacia seyal* et *Sclerocarya birrea* peut être expliquée par la forme des arbres mêmes ; *Acacia seyal* par sa forme « entonnoir » augmente le ruissellement par le tronc en comparaison avec le *Sclerocarya birrea*. Dans la suite de l'étude, le ruissellement par le tronc et la teneur en azote et phosphore dans l'eau ruisselée seront mesurés pour valider ces hypothèses. Le ruissellement par le tronc n'est pas la seule explication pour l'humectation du sol en profondeur sous l'arbre. Van Noordwijk *et al.* (1991) ont montré l'importance des voies empruntées par des racines décomposées dans l'infiltration de l'eau de pluies. Dans les fosses creusées pour l'étude des racines primaires et secondaires, des racines décomposées ou en décomposition ont été

observées fréquemment. On avait l'impression que l'activité des termites sous l'arbre est élevée et leurs voies dans le sol jouent également un rôle positif dans l'infiltration de l'eau.

Pour l'*Acacia seyal* une concentration des racines fines a été observée à la limite du houppier et la densité des racines fines des ligneux diminue en s'éloignant du tronc. A une distance égale à 3 fois le rayon du houppier, la densité des racines fines est encore élevée, cela suggère que l'*Acacia seyal* a la potentialité d'exploiter des superficies assez grandes. La densité des racines de la strate herbacée augmente en s'éloignant de l'arbre, mais suite à un mauvais développement des herbes les quantités de biomasses racinaires obtenues sont basses. Cette situation peut s'expliquer par le micro relief dans la zone d'étude et la plupart des arbres était située sur les dunes de sable. Par contre, sous le *Sclerocarya birrea* (voir [Figure 6b](#) position 1), le système racinaire de la strate herbacée était bien développé et sa biomasse racinaire était 4 fois plus élevée que la biomasse racinaire de l'arbre. A la position 2 (2 fois le rayon du houppier), la biomasse racinaire des ligneux était plus élevée qu'à la position 1 et dépassait la biomasse racinaire des herbacées. Ce qui est étonnant c'est qu'à la position 3, les racines fines des ligneux étaient absentes. Théoriquement, la distance entre les racines traçantes augmente en s'éloignant de l'arbre et par conséquent la densité des racines fines diminue. Malgré le fait que l'échantillonnage des monolithes a été répété deux fois, il est possible que le hasard a fait que les monolithes soient prélevés dans une zone sans racines latérales, c'est-à-dire non exploitée par l'arbre. La technique d'échantillonnage des monolithes ne permet pas un nombre de répétitions élevé et le risque de se trouver dans une zone qui n'est pas représentative pour le milieu d'étude est inhérent à cette méthode.

Pour les deux espèces, la biomasse racinaire totale (racines arbre + strate herbacée) diminue en s'éloignant de la limite du houppier : 708, 423 et 252 kg ha⁻¹ pour les 3 positions observées pour l'*Acacia seyal* et 519, 321 et 306 kg ha⁻¹ pour le *Sclerocarya birrea*. Cette tendance correspond avec les observations que la teneur en matière organique du sol diminue en s'éloignant du tronc (Belsky *et al.*, 1989 ; [Breman & Kessler, in press](#)) et sur la base des données disponibles on peut estimer que la contribution des racines à l'accumulation de la matière organique du sol sous l'arbre est au moins 2 fois plus élevée qu'en plein champ, ce qui est confirmé par les teneurs en matière organique observées. Les gradients de la matière organique causés par les arbres n'ont pas seulement un effet positif sur la fertilité des sols, mais vraisemblablement aussi sur le recouvrement des éléments nutritifs.

Dans le cas d'*Acacia seyal* il a été observé que pour les trois positions d'échantillonnage, la majorité des racines fines de l'arbre se situait en dessous des racines fines de la strate herbacée. Pour le *Sclerocarya birrea* cela était valable seulement pour la position 1. La présence des racines fines des arbres en dessous des racines herbacées montre qu'il est possible que les arbres captent des éléments nutritifs qui devraient être lessivés en absence des arbres, et ainsi augmente l'efficacité d'utilisation des éléments nutritifs.

En fin, des études ont montré que l'*Acacia seyal* est une espèce fixatrice (Miettinen *et al.*, 1992), ce qui est confirmé par quelques nodules en état de résorption. La rareté des nodules chez *Acacia seyal* pourrait s'expliquer par le moment choisi pour effectuer les observations, après la fin de l'hivernage, ou par le fait que tous les pieds étaient des individus adultes.

Bibliographie

Batanouny, K.H. & Abdel Wahab, A.M., 1973. Eco-physiological studies on desert plants VIII. Root penetration of *Leptadenia pyrotechnica* (Forsk.) Decne. in relation to its water balance. *Oecologia* 11: 151-161.

Belsky, A.J., Amundson, R.G., Duxbury, J.M., Riha, S.J., Ali, A.R. & Mwonga S.M., 1989. The effect of trees on their physical, chemical and biological environments in a semi-arid savanna in Kenya. *Journal of Applied Ecology* 26: 1005-1024.

Böhm, W., 1979. Methods of studying root systems. Springer Verlag Berlin, 188 pp.

Breman, H., & Kessler, J.J., 1994. [Woody plants in semi-arid West-Africa](#). Springer Verlag, Heidelberg/Berlin, *in press*.

Charreau, C. & Vidal, P., 1965. Influence de l'*Acacia albida* Del. sur le sol, nutrition minérale et rendements des mils

Pennisetum au Sénégal. l'Agronomie tropicale 20: 600-626.

Glevers, P.E., 1951. The root system of some British Somaliland plants. The East African Agriculture 17: 38-50.

Grouzis, M., Nizinski, G. & Fournier, C., 1990. L'arbre et l'herbe au Sahel. Séminaire physiologie des arbres et arbustes des zones arides. 27 Mars - 6 Avril 1990, Nancy, France.

Grzebisz, W., Floris, J. & Van Noordwijk, M., 1989. Loss of dry matter and cell contents from fibrous roots of sugar beet due to sampling, storage and washing. Plant & Soil 113: 53-57.

Janssen, B.H., 1983. Organische stof en bodemvruchtbaarheid, collegedictaat 06-17-4311. Landbouw Universiteit Wageningen, Vakgroep Bodemkunde en Plantevoeding, pp. 215.

Kater, L.J.M., Kanté, S. & Budelman, A., 1992. Karité (*Vitellaria paradoxa*) and néré (*Parkia biglobosa*) associated with crops in South Mali. Agroforestry Systems 18: 89-105.

Kessler, J.J., 1992. The influence of karité (*Vitellaria paradoxa*) and néré (*Parkia biglobosa*) on sorghum production in Burkina-faso Agroforestry systems 14: 97-118.

Kessler, J.J. & Breman, H., 1991. The potential of agroforestry to increase primary production in the Sahelian and Sudanian zones of West Africa. Agroforestry Systems 13: 41-62.

Lawson, G.W., Jenik, J. & Armstrong Mensah K.O., 1968. A study of a vegetation catina in Guinea savanna at mole game reserve (Ghana).

Le Houérou, H.N., 1980. The role of browse in the Sahelian and Sudanian zones. In: Le Houérou, H.N.(ed), Browse in Africa, ILCA, Addis Ababa, Ethiopia. pp. 83-102.

Marschner, H., 1991. Plant-soil relationships; acquisition of mineral nutrients by roots from soils. In: J.R. Porter & D.W. Lawlor (eds), Plant growth; interactions with nutrition and environment. Cambridge University Press, p. 125-155.

Miettinen, P., Karsisto, M. & Musa, M.G., 1992. Nodulation of nine nitrogen-fixing tree species grown in central Sudan. Forest Ecology and Management, 48: 107-119.

Penning de Vries, F.W.T. & Djitéye, 1982. [La productivité des pâturages sahéliens. Une étude des sols, des végétations et de l'exploitation de cette ressource naturelle](#). Agric. Res. Rep. 918, Pudoc Wageningen, 525 pp.

Rutherford, M.C. 1983. Growth rates, biomass and distribution of selected woody plant roots in *Burkea africana*-*Ochna pulchra* savanna. Vegetatio 52: 45-63.

Sanchez, P.A., 1976. Properties and mangement of soil in the tropics. Interscience, New York, Wiley, 618 pp.

Schuurman, J.J. & Goedewaagen, M.A.J., 1971. Methods for the examination of root systems and roots. Second ed., Pudoc, Wageningen, 86 pp.

Stroosnijder, L., 1982. La pédologie du Sahel et du terrain d'étude. Dans: [Penning de Vries, F.W.T. & Djitéye](#), La productivité des pâturages sahéliens. Une étude des sols, des végétations et de l'exploitation de cette ressource naturelle. Agric. Res. Rep. 918, Pudoc Wageningen, pp. 52-71.

Stroosnijder, L. & Koné, D., 1982 Le bilan d'eau du sol. Dans: [Penning de Vries, F.W.T. & Djitéye](#), La productivité des pâturages sahéliens. Une étude des sols, des végétations et de l'exploitation de cette ressource naturelle. Agric. Res. Rep. 918, Pudoc Wageningen, pp. 133-165.

Traoré, B. & Vaksman, M., 1993. Caractérisation de la saison de culture. Projet Sol-Eau-Plante, Ministère de développement rural et de l'environnement, Institut d'Economie Rurale, Bamako, Mali. Internal Report, 12 pp.

- Van der Pol, F., 1992. Soil mining, an unseen contributor to farm income in southern Mali. Bulletin 325, Royal Tropical Institute Amsterdam, 48 pp.
- Van Keulen, H. & Breman, H., 1990. Agricultural development in the West African Sahelian region; a cure against land hunger? Agriculture, Ecosystems and Environment, 32: 177-197.
- Van Noordwijk, M., 1993. Roots: length, biomass, production and mortality. In: Anderson, J.M. & Ingram, J.S.I. (eds.), 1993. Tropical soil biology and fertility. A handbook of methods. CAB International, Wallingford: 132-144.
- Van Noordwijk, M., Widiyanto, Heinen, M & Hairiah, K., 1991. Old tree root channels in acid soils in the humid tropics: Important for crop root penetration, water infiltration and nitrogen management. In: R.J. Wright *et al.* (Eds.), Plant soil interactions at low pH. Kluwer Academic Publishers, pp.423-430.
- Veldkamp, W.J., Traoré, A. & N'Diaye, M.K., 1991. Fertilité des sols du Mali, Mali-Sud/Office du Niger, interprétation des données analytiques des sols et des plantes. Laboratoire des Sols, IER-DRA-SRCVO, Sotuba, Bamako, 149 pp.
- Von Maydell, H.-J., 1983. Arbres et arbustes du Sahel, leurs caractéristiques et leurs utilisations. Verlag Josef Margraf, Weikersheim, 531 pp.
- Young, A., 1989. Agroforestry for soil conservation. ICRAF/CAB-International, 276 pp.