

Description du système racinaire de trois espèces fourragères en zone soudano-sahélienne : *Andropogon gayanus*, *Vigna unguiculata* et *Stylosanthes hamata*

J.J. Rob Groot ⁽¹⁾, Mouhamadou Traoré ⁽²⁾, Daouda Koné ⁽²⁾

⁽¹⁾ Institut de Biologie agronomique et de Fertilité du Sol (AB-DLO). B.P. 14. 6700 AA Wageningen (Pays-Bas).

⁽²⁾ Institut d'Économie Rurale (IER). B.P. 258. Bamako (Mali).

Reçu le 15 septembre 1997, accepté le 3 décembre 1997.

Une recherche sur le système racinaire de cultures fourragères (*Andropogon gayanus*, *Vigna unguiculata* et *Stylosanthes hamata*) a été entreprise en 1992 au Mali dans deux Stations de Recherche, en utilisant la méthode du monolithe. Celle-ci consiste à étudier les racines sur toute la profondeur du profil par blocs de sol formant chacun un cube élémentaire de 1 dm³. La biomasse racinaire produite par une population d'*A. gayanus* plantée en 1951, était de 4 t·ha⁻¹, celle d'une population plantée en 1991, produisait 5 t·ha⁻¹. Les biomasses aériennes atteignaient respectivement 12 et 8 t·ha⁻¹. L'essentiel (90 %) de la biomasse racinaire est concentré dans la couche 0–60 cm bien que la profondeur d'enracinement atteigne 180 cm. La biomasse racinaire décroît de façon exponentielle avec la profondeur, mais la diminution de la densité racinaire est faible. Cela se traduit par une augmentation de la longueur spécifique (longueur de racine par unité de biomasse racinaire) en profondeur. La biomasse racinaire de *V. unguiculata* atteignait 1 118 kg·ha⁻¹ sans apport de phosphore, contre 2 922 kg·ha⁻¹ avec apport de phosphore. L'effet du phosphore sur la biomasse aérienne était néanmoins négligeable. Aucune réduction de la longueur spécifique des racines n'a été observée en profondeur. La biomasse racinaire de *S. hamata* ne réagit pas clairement à l'apport de P : les résultats étant de 3 596 kg·ha⁻¹ sans apport de P et 4 161 kg·ha⁻¹ avec une dose non-limitative. Les biomasses aériennes respectives étaient de 8 360 kg·ha⁻¹ et 10 860 kg·ha⁻¹. La densité racinaire est élevée dans l'ensemble du profil, et la longueur spécifique s'accroît de 35 m·g⁻¹ pour la couche 0–20 cm à 100 m·g⁻¹ pour la couche 130–140 cm, permettant à *S. hamata* d'exploiter efficacement l'eau et les éléments nutritifs dans tout le profil.

Mots-clés. Racines, longueur spécifique, densité racinaire, phosphore, monolithe, culture fourragère, Mali.

Description of root systems of three fodder crops in the Soudano-Sahelian area: *Andropogon gayanus*, *Vigna unguiculata* and *Stylosanthes hamata*. Root systems of fodder crops (*Andropogon gayanus*, *Vigna unguiculata* and *Stylosanthes hamata*) were studied at two Research Stations in Mali in 1992, using soil monoliths. In this method, roots are studied throughout the soil profile in cubical compartments of 1 dm³. Root biomass production of *A. gayanus* planted in 1951 was 4 t·ha⁻¹ against 5 t·ha⁻¹ when planted in 1991. Above-ground biomass was 12 and 8 t·ha⁻¹, respectively. The majority (90%) of the root biomass was concentrated in the upper 60 cm of the soil profile even if the root depth reached 180 cm. Root biomass decreased with depth following a negative exponential curve, but root length density decreased to a lesser extent, resulting in increasing specific root length (root length per unit of root biomass) with depth. Root biomass of *V. unguiculata* was 1,118 kg·ha⁻¹ without phosphorus fertilization and 2,922 kg·ha⁻¹ with P fertilization. The effect of P on above ground biomass was negligible, and no reduction of specific root length with depth was observed. Root biomass production by *S. hamata* hardly responded to P fertilization: 3,596 kg·ha⁻¹ without P and 4,161 kg·ha⁻¹ with non-limiting P-supply; above-ground biomass was 8,360 and 10,680 kg·ha⁻¹ respectively. Root length density was relatively high for the whole root profile and specific root length increased from 35 m·g⁻¹ for the 0–20 cm layer to 100 m·g⁻¹ for the 130–140 cm layer, allowing *S. hamata* to use water and nutrients efficiently throughout the whole profile.

Keywords. Roots, specific root length, root length density, phosphorus, soil monolith, fodder crops, Mali.

INTRODUCTION

Au Mali comme dans les autres pays sahéliens, l'objectif prioritaire des gouvernements est d'assurer l'autosuffisance alimentaire. Toutefois, la croissance

rapide de la population et le faible niveau des productions végétales et animales sont tels que ce but devient difficile à atteindre. Un des motifs principaux du problème culturel réside dans l'absence de données quantitatives relatives aux processus assurant la

stabilité des systèmes de production, particulièrement en ce qui concerne l'utilisation optimale de l'azote et du phosphore (Penning de Vries, Djitéye, 1982). À long terme, l'exportation des éléments nutritifs du sol peut, en absence de restitution, conduire à une dégradation des terres agricoles. À cet égard, une connaissance plus approfondie de certaines caractéristiques des espèces végétales occupant un rôle majeur dans l'exploitation des potentialités naturelles et des intrants externes mérite une attention spéciale. Le système racinaire constitue l'une de ces caractéristiques primordiales eu égard au rôle qu'il joue dans l'absorption des éléments nutritifs et de l'eau. L'étude de la distribution verticale de l'enracinement des plantes présente un intérêt évident en faveur d'une meilleure compréhension de l'utilisation des éléments nutritifs dont peuvent disposer une végétation ou une culture (De Willigen, Van Noordwijk, 1987). De plus, la biomasse racinaire contribue à l'apport de matière organique dans le sol par des débris de racines mortes et des exsudats racinaires, et favorise ainsi le développement racinaire des cultures. En effet, cet apport influence directement la nutrition de la plante ainsi que les propriétés physico-chimiques des sols (capacité d'échange des cations) par sa minéralisation et son importance dans la dynamique de l'azote. La disponibilité des éléments nutritifs par rapport à la matière organique – qui est l'agent principal de la stabilisation de la structure du sol – constitue l'une des propriétés primordiales du sol en matière de développement de systèmes de production durables.

L'absorption de l'eau et des éléments nutritifs dépend non seulement de la longueur et de la surface des racines, mais aussi de leur répartition dans les différents horizons. Outre le diamètre ainsi que le poids et la longueur, la densité des racines constitue un paramètre déterminant le degré d'exploitation du sol. En effet, la densité racinaire optimale nécessaire à une exploitation efficace d'un sol pour le nitrate, par exemple, est du même ordre de grandeur que celle pour une utilisation efficace de l'eau. Cependant, l'absorption satisfaisante du phosphore (P) nécessite une densité dix fois supérieure. Ainsi donc, on peut imaginer que si les couches supérieures du sol sont exploitées valablement pour l'eau et l'azote, elles ne le sont que faiblement pour le phosphore.

En dépit de la multitude des méthodes utilisées, force est de reconnaître que les investigations racinaires présentent jusqu'à présent des difficultés majeures, à savoir : la longueur de temps requise pour l'extraction des racines du sol et le concours d'une main d'œuvre importante n'aboutissant souvent qu'à une récolte incomplète (Böhm, 1979 ; Van Noordwijk, 1993). Par ailleurs, il est également difficile de différencier les racines vivantes des racines mortes.

Enfin, le système racinaire des espèces fourragères n'a fait l'objet que de très peu de recherches au Mali. La présente étude vise à décrire le système racinaire de populations d'*Andropogon gayanus* Kunth implantées en 1951 et en champs expérimentaux en 1991. Des descriptions similaires sont faites pour les légumineuses *Vigna unguiculata* (L.) Walp. et *Stylosanthes hamata* L.

MATERIELS ET METHODES

Caractéristiques géographiques et climatiques du milieu de l'étude

L'étude a été menée au Mali dans les Stations de Recherche Agronomique de Cinzana et de N'Tarla.

Cinzana est située à 5°55' E et 13°10' N, à une altitude moyenne de 280 m. Elle bénéficie d'un climat de type soudano-sahélien avec une pluviosité annuelle moyenne de 750 mm. La saison des pluies se situe entre juin et mi-octobre, le maximum de pluies tombant au mois d'août (111,7 mm). Durant l'année d'étude (1992), la pluviométrie a atteint 698 mm. Les températures moyennes annuelles oscillent entre 28 et 33°C, avec des températures minimales de 8 à 12°C au mois de janvier et des températures maximales de 39 à 40°C au mois d'avril.

N'Tarla est située à 5°42' O et 12°35' N, à une altitude moyenne de 310 m. Son climat est de type soudanien, avec une saison pluvieuse s'étendant de mai à octobre, avec un pic pluviométrique au mois d'août (260 mm). Entre 1951 et 1967, la pluviosité annuelle moyenne avoisinait 1000 mm ; pour la période 1968–1992, elle a chuté à 903 mm par an. Pendant l'année d'étude (1992), la pluviométrie a atteint 987 mm. Les températures moyennes annuelles avoisinent les 26 à 28°C, avec des températures minimales de 6 à 14°C au mois de janvier et des températures maximales de 36 à 41°C au mois d'avril.

Caractéristiques physico-chimiques du sol

Le **tableau 1** fournit les caractéristiques physico-chimiques des sols dans les deux sites étudiés. La parcelle n° 1 de Cinzana est située au bas d'une pente, ce qui explique des taux de limon et d'argile plus élevés en profondeur par rapport aux autres parcelles. À Cinzana, le pH des couches superficielles est légèrement acide (environ 5,5) et décroît avec la profondeur (pH de 5,1 en moyenne). La teneur en carbone pour les trois parcelles diminue avec la profondeur ; il y a cependant une légère augmentation pour les couches les plus profondes. La teneur en P-total reste constante sur tout le profil et le niveau de P-assimilable est très bas. La CEC est peu élevée (2–4 méq/100 g) et augmente légèrement

Tableau 1. Caractéristiques physico-chimiques des sols — *Physico-chemical soil properties.*

| Site et parcelle | Couche (cm) | pH (eau) | Argile (%) | Limons (%) | Sable (%) | C (1) (%) | N (2) (%) | CEC (3) (még/100g) | sat (4) (%) | P-tot (5) (ppm) | P-ass (6) (ppm) |
|---|-------------|----------|------------|------------|-----------|-----------|-----------|--------------------|-------------|-----------------|-----------------|
| Cinzana | 0–20 | 5,7 | 6,4 | 7,0 | 86,6 | 0,28 | 0,02 | 1,7 | 100 | 59,5 | 3,9 |
| | 20–40 | 5,2 | 11,1 | 9,6 | 79,3 | 0,27 | 0,02 | 2,1 | 70 | 56,5 | 1,2 |
| | 40–60 | 5,0 | 15,6 | 9,3 | 75,1 | 0,18 | 0,01 | 2,9 | 51 | 66,5 | 0,9 |
| n° 1 | 60–80 | 5,0 | 17,8 | 8,8 | 73,3 | 0,16 | 0,01 | 2,7 | 45 | 59,5 | 1,0 |
| | 80–100 | 5,1 | 20,7 | 10,1 | 69,2 | 0,30 | 0,01 | 3,2 | 56 | 61,0 | 1,1 |
| | 100–120 | 5,1 | 18,0 | 14,0 | 67,9 | 0,41 | 0,01 | 3,2 | 73 | 63,5 | 1,5 |
| | 120–140 | 5,3 | 29,4 | 21,7 | 48,9 | 0,54 | 0,02 | 4,4 | 70 | 65,5 | 0,1 |
| | | 0–20 | 5,7 | 4,5 | 11,0 | 84,4 | 0,22 | 0,02 | 1,7 | 58 | 53,5 |
| n° 2 (0 kg P ₂ O ₅ /ha) | 20–40 | 5,1 | 8,0 | 11,4 | 80,5 | 0,21 | 0,01 | 2,7 | 39 | 60,5 | 1,3 |
| | 40–60 | 5,0 | 11,0 | 7,6 | 81,4 | 0,25 | 0,01 | 2,1 | 19 | 54,5 | 1,5 |
| | 60–80 | 5,0 | 9,8 | 7,5 | 82,6 | 0,19 | 0,01 | 1,8 | 76 | 58,5 | 1,6 |
| | 80–100 | 5,0 | 12,7 | 9,9 | 77,3 | 0,56 | 0,01 | 2,5 | 40 | 60,5 | 1,5 |
| | 100–120 | 5,1 | 15,2 | 10,6 | 74,2 | 0,35 | 0,01 | 3,4 | 43 | 67,5 | 1,5 |
| | 120–140 | 5,2 | 17,0 | 10,6 | 72,4 | 0,23 | 0,01 | 2,1 | 40 | 61,5 | 1,7 |
| n° 3 (200 kg P ₂ O ₅ /ha) | 0–20 | 5,3 | 5,5 | 7,9 | 86,6 | 0,43 | 0,01 | 2,2 | 2 | 72,5 | 23,3 |
| | 20–40 | 5,0 | 9,3 | 9,0 | 81,7 | 0,20 | 0,01 | 3,4 | 26 | 61,5 | 3,2 |
| | 40–60 | 4,9 | 10,4 | 10,1 | 79,5 | 0,16 | 0,02 | 2,1 | 34 | 54,5 | 2,3 |
| | 60–80 | 5,1 | 11,5 | 8,8 | 79,6 | 0,13 | 0,01 | 2,2 | 50 | 54,5 | 2,9 |
| | 80–100 | 5,0 | 15,0 | 8,2 | 76,8 | 0,14 | 0,01 | 3,6 | 39 | 57,5 | 2,0 |
| | 100–120 | 5,0 | 16,5 | 10,2 | 73,3 | 0,12 | 0,02 | 3,0 | 48 | 56,5 | 2,3 |
| | 120–140 | 5,1 | 16,2 | 9,6 | 74,1 | 0,40 | 0,01 | 3,6 | 70 | 60,5 | 2,7 |
| N'Tarla | 0–20 | 6,2 | 4,5 | 29,4 | 66,0 | 0,30 | 0,04 | 3,1 | 86 | 68,5 | 2,1 |
| | 20–40 | 6,3 | 6,2 | 21,6 | 72,2 | 0,36 | 0,02 | 1,1 | 100 | 43,5 | 0,9 |
| | 40–60 | 5,8 | 15,2 | 23,3 | 61,5 | 0,33 | 0,02 | 3,3 | 87 | 60,0 | 0,9 |
| | 60–80 | 5,6 | 29,5 | 20,1 | 50,4 | 0,24 | 0,02 | 2,5 | 100 | 86,5 | 0,3 |
| | 80–100 | 5,4 | 31,8 | 20,6 | 47,6 | 0,10 | 0,02 | 5,7 | 38 | 73,5 | 0,3 |
| | 100–120 | 5,3 | 31,3 | 19,6 | 49,1 | 0,14 | 0,01 | 5,7 | 56 | 71,5 | 0,3 |
| | 120–140 | 5,2 | 30,4 | 20,7 | 48,9 | 0,07 | 0,01 | 5,5 | 56 | 76,5 | 0,1 |
| | 140–160 | 5,2 | 29,5 | 22,9 | 47,6 | 0,29 | 0,01 | 5,5 | 52 | 73,0 | 0,04 |
| | 160–180 | 5,1 | 30,0 | 24,6 | 45,4 | 0,37 | 0,01 | 5,7 | 44 | 67,5 | 0,1 |

(1) teneur en carbone ; (2) teneur en azote ; (3) capacité d'échange cationique ; (4) taux de saturation en bases ; (5) teneur en phosphore total ; (6) teneur en phosphore assimilable.

avec la profondeur ; la saturation des bases se situe par ailleurs à 40–50 %, sauf pour les couches superficielles de la parcelle n° 1 qui présentent des valeurs élevées.

Pour N'Tarla (**Tableau 1**), la couche 0–60 cm est sablo-limoneuse. Au-delà de cette profondeur, la teneur en sable diminue en faveur de la teneur en argile. Le pH atteste un milieu presque neutre pour les couches superficielles mais diminue avec la profondeur. La teneur en carbone décroît en profondeur, néanmoins on observe une légère augmentation à partir de 140 cm. Les teneurs en azote diminuent avec la profondeur. La teneur en P-total reste plus ou moins constante dans l'ensemble du profil mais le niveau de P-assimilable est faible. La CEC quoique basse est plus élevée en profondeur ; le taux de saturation en bases de la couche 0–80 cm est élevé (86–100 %), mais il est faible à partir de 80 cm.

Le site de Cinzana servant de cadre aux essais est constitué d'un versant à cuirasse profonde qui forme les sols rouges sableux. L'étude du profil pédologique (Keita *et al.*, 1981) montre que ce type de sol appartient à la catégorie des sols dits ferrugineux tropicaux appauvris modaux sur matériaux d'épannage éoliens. Le site de N'Tarla, sur lequel se trouve la population de *A. gyanus*, est un bas glacis à surface plane. L'étude du profil pédologique (Keita, 1990) montre que ce type de sol peut être classé dans la catégorie des sols dits ferrugineux tropicaux peu lessivés modaux.

Méthode d'étude du système racinaire

Dans cette étude, la technique choisie est celle du prélèvement de monolithe. Celui-ci est délimité par une planche à clous ou "lit de fakir" qui a été

appliquée contre la paroi du profil obtenu après creusement d'une fosse (**Figure 1**). En ce qui concerne les détails de la méthodologie, on peut se référer à Schuurman et Goedewaagen (1971) et Böhm (1979). La **figure 2** indique la position de la planche à clous pour les trois cultures envisagées. Pour pouvoir maintenir les racines en place en cours de lavage – dans leur position initiale comme à l'intérieur du sol – on introduit un filet en plastique (maille de 1×2 cm) entre la planche et la paroi du profil ; on extrait le monolithe par des découpes du sol sur 10 cm (longueur des clous) le long de la planche et par sciage, à l'aide d'un fil en acier inoxydable, de la surface de sol opposée à la planche. Le monolithe extrait est lavé sous une pression d'eau modulable. Les échantillons de racines sont récoltés par blocs consistant en cubes de 1 dm^3 et mis dans des sachets en plastique. Au cours de l'opération, on arrose régulièrement les racines pour ralentir la mortalité des cellules. Par ailleurs, l'intégrité des membranes n'est pas garantie et les racines blessées perdent leur contenu cellulaire (sucre, éléments nutritifs). Les

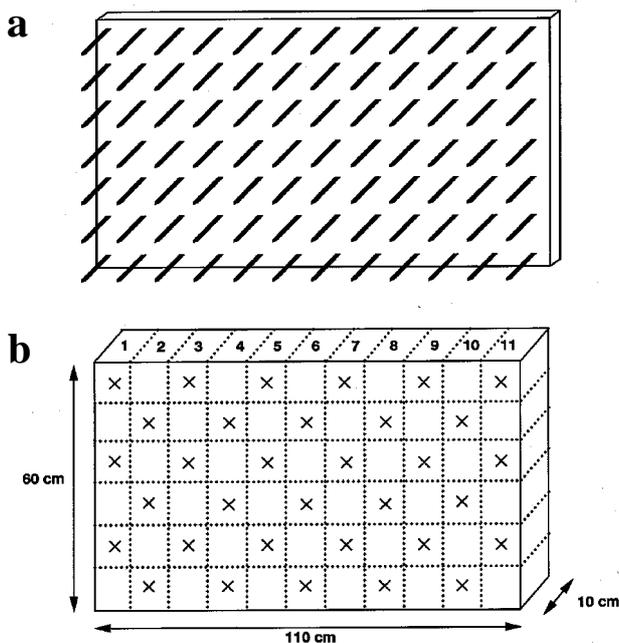


Figure 1. Planche à clous (a) et schéma du volume de sol qu'elle permet de prélever sur 60 cm de profondeur (b). Les cubes de 1 dm^3 constituant des blocs sur lesquels se font les mesures des paramètres racinaires sont délimités en pointillé. La longueur racinaire a été déterminée au sein des compartiments marqués d'une croix — *Nailed board* (a) with a schematic representation of the soil volume that can be collected with it on a 60 cm depth (b). Dots delimit soil compartments as 1 dm^3 cubes on which root parameters are measured. Root length was only determined on those compartments marked with a cross.

pertes de matière sèche sont d'environ 20 à 50 % (Grzebisz *et al.*, 1989), ces taux étant fonction de l'espèce et de l'âge des racines. Dans l'interprétation des données, la perte moyenne a été évaluée à 35 %. Les racines ont été divisées en deux classes de diamètre (inférieur à 2 mm et supérieur à 2 mm). Les diamètres des racines ont été mesurés à l'aide d'un micromètre à lecture automatique ou d'un pied à coulisse ordinaire.

La biomasse racinaire a été déterminée en pesant tous les échantillons par classe de diamètre et par compartiment de 10×10 cm, après séchage à 70°C pendant 48 heures. La mesure de la longueur des racines succède à l'estimation de la biomasse. Elle a porté sur 50 % des échantillons racinaires (**Figure 1b**). Pour ce faire, deux méthodes ont été appliquées. L'une, directe, consiste à déterminer la longueur totale d'un échantillon racinaire par étalement de la racine le long d'une règle graduée. Cette méthode a été appli-

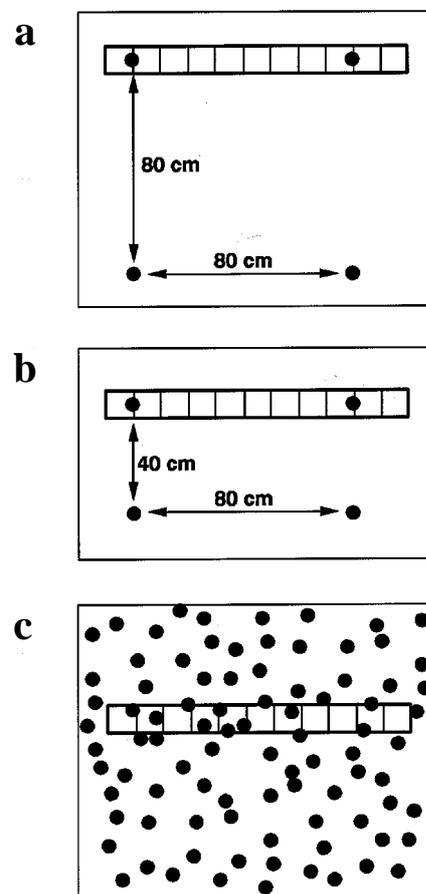


Figure 2. Position de la planche à clous pour les différentes cultures (les points indiquent la position des pieds des plants). a : *Andropogon gayanus* ; b : *Vigna unguiculata* ; c : *Stylosanthes hamata* — Localisation of the nailed board within the field of the different studied crops (dots indicate the stalk of each plant).

quée principalement sur les échantillons racinaires sans ramifications secondaires et tertiaires. L'autre méthode, indirecte, a été développée par Newman (1966) et Tennant (1975). Les racines découpées et colorées grâce à du rouge de sulframine sont dispersées, selon des orientations aléatoires, dans une fine lame d'eau au-dessus d'une plaque de verre (25 × 25 cm). Une grille (photocopiée sur un folio en acétate) est placée au-dessous de la plaque de verre. Ligne par ligne, la totalité des intersections des racines correspondant aux lignes de la grille sont additionnées. Les résultats des lignes horizontales (*H*) et verticales (*V*) de la grille sont cumulés sans tenir compte de la position des lignes de la grille, pour obtenir le nombre *N*.

Si la longueur du côté d'une maille de la grille est *D* (mm), la longueur de la racine *L* (mm) est déterminée à partir de l'équation suivante

$$L = 0,25 \times N \times D.$$

Si *D* est fixé à 40, soit 12,7 mm

$$L = 10 N \text{ (mm)}.$$

Description des études menées

***Andropogon gayanus* Kunth.** À Cinzana, l'étude a été menée en septembre 1992 dans une parcelle (parcelle n°1 du **tableau 1**) mise en place en 1991 et sur une jachère de plus de 10 ans. L'écartement entre les pieds était de 80 × 80 cm (**Figure 2a**). L'observation a porté sur les prélèvements racinaires de monolithes issus de deux fosses (fosses 1 et 2) regroupant chacune deux pieds d'*A. gayanus*. Le système racinaire a été suivi jusqu'à 120 cm de profondeur (présence d'une cuirasse latéritique).

À N'Tarla, l'étude a été menée sur une bande d'*A. gayanus* de 12 m de large. Cette bande anti-érosive implantée depuis 1951 a été assimilée à une population naturelle. L'étude a été réalisée pendant la période de pleine croissance végétative des plantes, du 1^{er} au 10 octobre. L'observation a porté sur les prélèvements de trois monolithes (fosses 3 et 4) et ceci jusqu'à 200 cm de profondeur

***Vigna unguiculata* (L.) Walp. var. Niban** (nom vernaculaire : niébé). L'étude a été menée à Cinzana en octobre 1992 sur deux parcelles : l'une ayant reçu 0 kg·ha⁻¹ de P₂O₅ depuis le démarrage de l'essai, (traitement P₀, parcelle n°2 du **tableau 1**) et l'autre 240 kg·ha⁻¹ de P₂O₅ en 1991 et 1992 (traitement P₂₄₀). L'écartement entre les pieds était de 40 × 80 cm (**Figure 2b**). Deux monolithes (fosses 5 et 6) ont été prélevés pour le traitement P₀ ; pour le traitement P₂₄₀, on s'est limité à un seul monolithe (fosse 7). Dans chacune des fosses, le système racinaire a été suivi jusqu'à 180 cm de profondeur.

***Stylosanthes hamata* L. var. Verano.** L'étude a été conduite à Cinzana au début du mois de novembre 1992, sur deux parcelles mises en place en 1991. Ces parcelles étaient colonisées par des plantes âgées de deux ans et de jeunes pieds âgés d'un an et issus d'un semis naturel. Le phosphore a été appliqué à raison de 0 kg·ha⁻¹ de P₂O₅ (traitement P₀, parcelle n° 2 du **tableau 1**), et de 200 kg·ha⁻¹ de P₂O₅ en 1991 et 1992 (traitement P₂₀₀, parcelle n°3 du **tableau 1**). Les monolithes ont été prélevés dans deux fosses (fosses 8 et 9) et ceci jusqu'à 160 cm de profondeur.

RESULTATS

Description du système racinaire

Biomasse racinaire d'*Andropogon gayanus*. Le **tableau 2** donne le poids sec des racines fines (< 2 mm) pour les blocs d'un dm³ issus d'un monolithe (fosse 2) sous *A. gayanus* à Cinzana (parcelle n° 1). Le poids des racines est exprimé en grammes (racines) par litre de sol. Pour chaque couche de 10 cm du monolithe, on a calculé la biomasse racinaire totale (colonne "Cumul."). Si l'on considère que le monolithe est représentatif de l'ensemble de la parcelle, la biomasse racinaire par couche (en kg·ha⁻¹) peut être calculée par simple extrapolation linéaire, ceci après correction au niveau des pertes de 35 % du poids en cours de lavage (**Tableau 2**, colonne "Prod."). Le **figure 3** représente la distribution des racines fines dans la couche 0–10 cm. Il est évident que la densité des racines au niveau d'un pied (compartiments 2 et 10) est beaucoup plus élevée que la densité à mi-distance entre deux pieds (compartiment 6), ce qui implique qu'une extrapolation linéaire surestime la production par unité de surface du fait de l'usage d'un cadre de 110 cm. Pour tenir compte de cette variabilité spatiale, on a appliqué la théorie de Van Noordwijk *et al.* (1985). Cette théorie suppose que le système racinaire dispose d'une symétrie radiale (**Figure 4**) et permet de déterminer la densité pour un écartement fixe des pieds (ici 80 × 80 cm). On admet que le système racinaire d'un pied ne se développe pas au-delà d'un rayon de 60 cm. Pour le premier cercle entourant chaque pied (marqué I à la **figure 4**), la densité racinaire correspond à la mesure de densité racinaire pour le compartiment **a** du monolithe. Pour l'anneau II, la densité correspond à la densité du compartiment **b** du monolithe ; en ce qui concerne l'anneau III, il y a interférence avec les racines des pieds avoisinants. La densité moyenne par unité de surface (le carré indiqué autour du pied) peut être calculée comme étant la contribution pondérée des différentes densités, par application des équations fournies par Van Noordwijk *et al.* (1985). Ces corrections n'ont été apportées que pour les

Tableau 2. Poids sec des racines fines ($< 2\text{mm}$) par compartiment de la fosse 2 (en $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$), sous *Andropogon gayanus*, prélevé le 21 septembre 1992 à Cinzana — *Dry weight of fine roots ($< 2\text{mm}$) per compartment of monolith 2 (in $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$), for Andropogon gayanus at Cinzana, sampling 21 September 1992.*

| Couche (cm) | Compartiments | | | | | | | | | | | Cumul. (1) ($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) | Prod. (2) ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) | Corrigé (3) ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) |
|-------------|---------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|---|--|--|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | | | |
| 00–10 | 3,36 | 8,76 | 3,27 | 1,54 | 0,38 | 0,63 | 0,76 | 1,39 | 3,07 | 8,21 | 3,21 | 34,58 | 4836 | 1747 |
| 10–20 | 0,99 | 0,32 | 0,51 | 0,24 | 0,51 | 0,55 | 0,55 | 0,54 | 0,70 | 0,05 | 0,71 | 5,67 | 793 | 679 |
| 20–30 | 0,26 | 0,10 | 0,13 | 0,30 | 0,38 | 0,12 | 0,15 | 0,18 | 0,24 | 0,14 | 0,13 | 2,13 | 298 | 298 |
| 30–40 | 0,10 | 0,09 | 0,08 | 0,09 | 0,18 | 0,15 | 0,10 | 0,07 | 0,18 | 0,10 | 0,06 | 1,20 | 168 | 168 |
| 40–50 | 0,17 | 0,06 | 0,07 | 0,12 | 0,06 | 0,06 | 0,07 | 0,05 | 0,14 | 0,09 | 0,05 | 0,94 | 131 | 131 |
| 50–60 | 0,07 | 0,08 | 0,04 | 0,05 | 0,18 | 0,11 | 0,01 | 0,04 | 0,03 | 0,06 | 0,07 | 0,74 | 103 | 103 |
| 60–70 | 0,04 | 0,03 | 0,04 | 0,07 | 0,02 | 0,05 | 0,07 | 0,04 | 0,03 | 0,04 | 0,05 | 0,48 | 67 | 67 |
| 70–80 | 0,02 | 0,01 | 0,02 | 0,02 | 0,01 | 0,03 | 0,05 | 0,06 | 0,01 | 0,06 | 0,01 | 0,30 | 42 | 42 |
| 80–90 | 0,04 | 0,02 | 0,04 | 0,01 | 0,01 | 0,04 | 0,01 | 0,10 | 0,02 | 0,06 | 0,02 | 0,37 | 52 | 52 |
| 90–100 | 0,04 | 0,04 | 0,03 | 0,02 | 0,03 | 0,03 | 0,05 | 0,03 | 0,02 | 0,05 | 0,04 | 0,38 | 53 | 53 |
| 100–110 | 0,03 | 0,02 | 0,06 | 0,01 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,03 | 0,01 | 0,03 | 0,01 | 0,32 | 45 | 45 |
| 110–120 | 0,02 | 0,05 | 0,06 | 0,07 | 0,02 | 0,02 | 0,01 | 0,03 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,31 | 43 | 43 |
| Total | | | | | | | | | | | | | 6632 | 3428 |

(1) Résultats cumulés des onze compartiments d'une couche.

(2) Production ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) = $1000 \times (\text{Cumul.}/11)/0,65$.

(3) Corrigé ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) = $1000 \times [0,0125(b_2 + b_3 + b_{10} + b_{11}) + 0,0735(b_4 + b_9) + 0,1439(b_5 + b_8) + 0,1832(b_6 + b_7)]/0,65$ où les termes b_i représentent les valeurs mesurées des blocs de la couche pour laquelle le calcul est effectué. La correction indiquée ici ne porte que sur les couches 0–10 cm et 10–20 cm.

couches 0–10 cm et 10–20 cm, car pour les couches plus profondes, la densité est presque homogène (Tableau 2). Pour les grosses racines, aucune interférence ne s'exerce entre les systèmes racinaires des différents pieds. Par ailleurs, la présence de grosses racines est limitée aux couches 0–10 cm et 10–20 cm.

En utilisant une approche identique à celle qui vient d'être explicitée, la biomasse racinaire d'*A. gayanus* a pu être estimée à partir des données brutes (Groot *et al.*, 1995) relevées sur d'autres

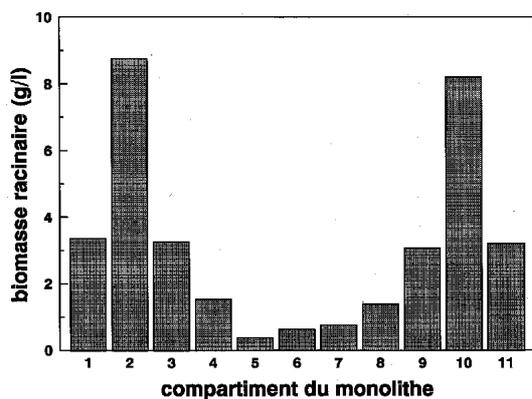


Figure 3. Distribution des racines fines d'*Andropogon gayanus* dans la couche 0–10 cm du monolithe 2 à Cinzana — *Distribution of fine roots for Andropogon gayanus in the 0–10 cm layer of monolith 2 at Cinzana.*

monolithes. Dans le tableau 3, les fosses 1 et 2 se rapportent à la culture d'*A. gayanus* à Cinzana (parcelle n°1), les fosses 3 et 4 représentant la même culture à N'Tarla. On constate que la biomasse des racines fines ($< 2\text{mm}$) est beaucoup plus importante que celle des grosses racines ($> 2\text{mm}$). En général, les grosses racines se limitent aux couches les plus superficielles (0–20 cm). L'essentiel de la biomasse racinaire se retrouve à faible profondeur (0–40 cm).

À Cinzana (fosses 1 et 2), la colonisation par les racines fines est limitée à 120 cm en raison de la présence d'une cuirasse à cette profondeur. Dans la première fosse, on observe en outre une légère augmentation de la biomasse racinaire à ce niveau. En général, la biomasse racinaire décroît de façon exponentielle avec la profondeur (Figure 5a). À N'Tarla (Tableau 3 - fosses 3 et 4), les racines descendent jusqu'à 180 cm, mais leurs biomasses en profondeur sont faibles. Bien que les fosses 1 et 2 et les fosses 3 et 4 puissent être considérées comme des répétitions, on constate de grandes différences entre leurs résultats : 2 025 et 3 493 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ pour les fosses 1 et 2, et 6 576 et 2 620 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ pour les fosses 3 et 4.

Biomasse racinaire de *Vigna unguiculata*. Les données brutes (Groot *et al.*, 1995) relevées sur les monolithes consacrés à l'étude de la distribution des racines de *V. unguiculata* montrent que dans les couches 0–10 et 10–20 cm, la biomasse racinaire

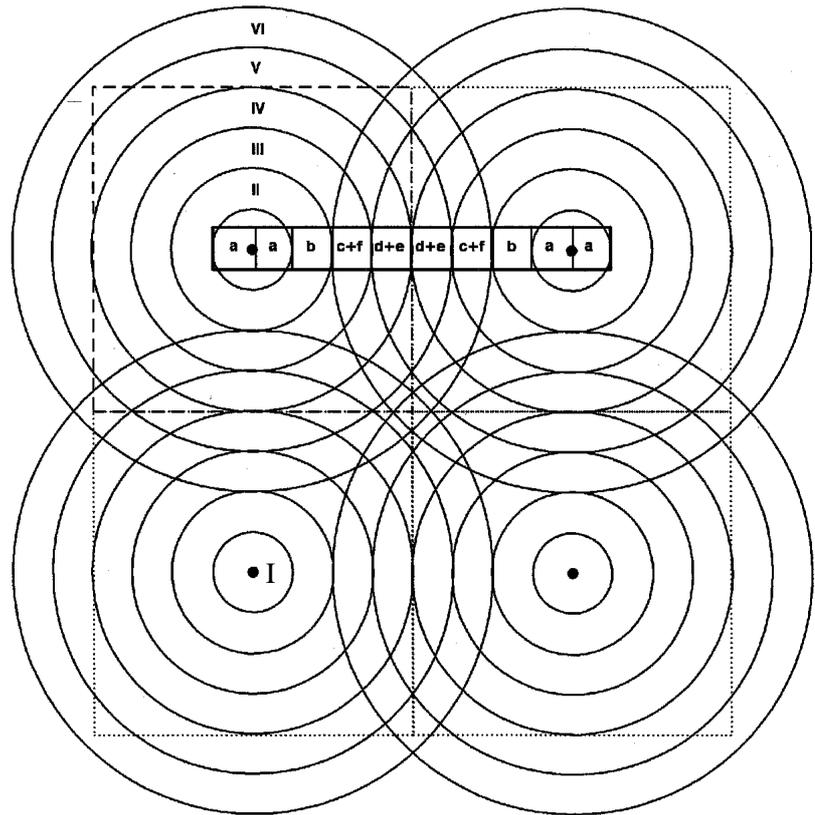


Figure 4. Représentation schématique de la distribution spatiale du système racinaire de quatre pieds d' *Andropogon gayanus* et emplacement du monolithe — *Theoretical spatial distribution of the roots around four stalks of Andropogon gayanus and position of the monolith.*

décroit lorsqu'on s'éloigne des pieds. Comme pour *A. gayanus*, nous considérons que la biomasse racinaire est homogène à partir de 20 cm de profondeur. Cependant, l'estimation des densités racinaires à partir des données brutes semble être plus délicate ici parce qu'il n'est pas évident qu'un pied de *V. unguiculata* dispose d'un système racinaire à symétrie radiale. Il est fort possible qu'il y ait compétition inégale entre les pieds individuels du fait de l'écartement de 40×80 cm, ce qui peut engendrer un système racinaire dissymétrique.

Pour *A. gayanus*, le poids des racines par unité de surface, dans la couche 0–10 cm, est, après corrections, inférieur de 54 % au poids obtenu par simple extrapolation linéaire (comparaison entre moyennes corrigées et non corrigées des quatre fosses). Pour la couche 10–20 cm, cette diminution n'est, en moyenne, plus que de 29 %. De même, pour *V. unguiculata*, il est évident que la valeur de la densité obtenue par simple extrapolation linéaire doit être réduite pour prendre en compte la variabilité spatiale, même si vraisemblablement elle doit être plus faible car la densité entre les pieds est deux fois plus élevée (40×80 cm). Nous avons arbitrairement réduit le poids racinaire de la couche 0–10 cm de 25 % et celui de la couche 10–20 cm de 12,5 % pour tenir compte de la variabilité spatiale (facteurs correctifs réduits de moitié environ par rapport à *A. gayanus*). Les grosses

racines ont la forme d'un pivot et descendent verticalement ; elles ne s'éloignent pas de plus de 10 cm du pied. Dans le **tableau 3**, les fosses 5, 6 et 7 se rapportent à *V. unguiculata* dans le site de Cinzana. La distribution de la biomasse racinaire est représentée par les **figures 5c** et **5d**. Comme pour *A. gayanus*, on constate que la biomasse des racines fines est bien supérieure à celle des grosses racines. Ces dernières, de type pivot, descendent jusqu'à 60 cm de profondeur. Pour les fosses 5 et 6 (traitement sans application de phosphore), les racines sont concentrées dans les premiers 20 cm du sol ; pour la fosse 7 (traitement $240 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \cdot \text{ha}^{-1}$), les racines sont distribuées dans les premiers 60 cm du sol. Pour les deux répétitions sans application de phosphore (fosses 5 et 6), la biomasse totale est du même ordre de grandeur ($1\ 030$ et $1\ 345 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$) ; pour le traitement avec apport de $240 \text{ kg P}_2\text{O}_5$ (fosse 7), la biomasse est supérieure ($2\ 922 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$). La **figure 5** montre que les biomasses sont considérables, même pour les couches profondes.

Biomasse racinaire de *Stylosanthes hamata*.

L'interprétation des données pour *S. hamata* diffère des autres cultures car les pieds sont distribués de façon dense et homogène (**Figure 2c**). Des données brutes (Groot *et al.*, 1995) il ressort que la variabilité de la biomasse à l'intérieur d'une couche est limitée. Aussi, n'y a-t-il pas lieu d'avoir recours à un facteur

Tableau 3. Biomasse racinaire (kg·ha⁻¹) après réalisation des corrections pour la variabilité spatiale — *Root biomass distribution (kg·ha⁻¹); data of the upper layers are adapted to account for spatial variability of root distribution.*

| N° de fosse* | <i>Andropogon gayanus</i> | | | | <i>Vigna unguiculata</i> | | | <i>Stylosanthes hamata</i> | |
|------------------------------------|---------------------------|------|------|------|--------------------------|------|------|----------------------------|------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| Racines fines (< 2 mm) | | | | | | | | | |
| 00–10 | 693 | 1747 | 2286 | 1048 | 304 | 298 | 417 | 1459 | 877 |
| 10–20 | 207 | 679 | 1489 | 705 | 231 | 184 | 705 | 576 | 445 |
| 20–30 | 157 | 298 | 265 | 247 | 74 | 69 | 358 | 267 | 298 |
| 30–40 | 103 | 168 | 123 | 103 | 66 | 92 | 232 | 248 | 200 |
| 40–50 | 80 | 131 | 58 | 69 | 49 | 52 | 204 | 197 | 232 |
| 50–60 | 67 | 103 | 51 | 92 | 45 | 64 | 404 | 448 | 288 |
| 60–70 | 39 | 67 | 21 | 30 | 20 | 45 | 56 | 158 | 140 |
| 70–80 | 53 | 42 | 13 | 39 | 18 | 34 | 53 | 138 | 130 |
| 80–90 | 41 | 52 | 23 | 30 | 22 | 31 | 48 | 126 | 113 |
| 90–100 | 24 | 53 | 14 | 35 | 20 | 27 | 62 | 122 | 108 |
| 100–110 | 38 | 45 | 4 | 32 | 18 | 36 | 77 | 73 | 87 |
| 110–120 | 76 | 43 | 4 | 19 | 28 | 53 | 64 | 110 | 130 |
| 120–130 | - | - | 5 | 27 | 12 | 55 | 15 | 50 | 99 |
| 130–140 | - | - | 1 | 19 | 3 | 49 | 6 | 35 | 84 |
| 140–150 | - | - | 8 | 11 | 0 | 49 | 4 | - | 115 |
| 150–160 | - | - | 5 | 19 | 3 | 9 | 3 | - | - |
| 160–170 | - | - | 4 | 20 | 0 | 6 | 0 | - | - |
| 170–180 | - | - | - | 6 | 0 | 3 | 0 | - | - |
| cumul | 1576 | 3428 | 4374 | 2551 | 914 | 1156 | 2708 | 4007 | 3345 |
| Grosses racines (> 2 mm) | | | | | | | | | |
| 00–10 | 325 | 64 | 2108 | 65 | 80 | 132 | 153 | 127 | 250 |
| 10–20 | 55 | 1 | 93 | 4 | 16 | 28 | 41 | 27 | 0 |
| 20–30 | 19 | 0 | 0 | 0 | 6 | 11 | 15 | 0 | 0 |
| 30–40 | 23 | 0 | 0 | 0 | 5 | 8 | 0 | 0 | 0 |
| 40–50 | 13 | 0 | 0 | 0 | 4 | 7 | 0 | 0 | 0 |
| 50–60 | 14 | 0 | 0 | 0 | 5 | 3 | 5 | 0 | 0 |
| 60–70 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 70–180 | - | - | - | 0 | 0 | 0 | 0 | - | - |
| cumul | 449 | 65 | 2202 | 69 | 116 | 189 | 214 | 154 | 250 |
| Production racinaire totale | | | | | | | | | |
| 00–10 | 1018 | 1810 | 4394 | 1113 | 384 | 430 | 570 | 1586 | 1127 |
| 10–20 | 262 | 680 | 1582 | 709 | 248 | 211 | 746 | 603 | 445 |
| 20–30 | 176 | 298 | 265 | 247 | 81 | 79 | 373 | 267 | 298 |
| 30–40 | 127 | 168 | 123 | 103 | 71 | 101 | 232 | 248 | 200 |
| 40–50 | 93 | 131 | 58 | 69 | 53 | 59 | 204 | 197 | 232 |
| 50–60 | 81 | 103 | 51 | 92 | 50 | 67 | 409 | 448 | 288 |
| 60–70 | 39 | 67 | 21 | 30 | 20 | 45 | 56 | 158 | 140 |
| 70–80 | 53 | 42 | 13 | 39 | 18 | 34 | 53 | 138 | 130 |
| 80–90 | 41 | 52 | 23 | 30 | 22 | 31 | 48 | 126 | 113 |
| 90–100 | 24 | 53 | 14 | 35 | 20 | 27 | 62 | 122 | 108 |
| 100–110 | 38 | 45 | 4 | 32 | 18 | 36 | 77 | 73 | 87 |
| 110–120 | 76 | 43 | 4 | 19 | 28 | 53 | 64 | 110 | 130 |
| 120–130 | - | - | 5 | 27 | 12 | 55 | 15 | 50 | 99 |
| 130–140 | - | - | 1 | 19 | 3 | 49 | 6 | 35 | 84 |
| 140–150 | - | - | 8 | 11 | 0 | 49 | 4 | - | 115 |
| 150–160 | - | - | 5 | 19 | 3 | 9 | 3 | - | - |
| 160–170 | - | - | 4 | 20 | 0 | 6 | 0 | - | - |
| 170–180 | - | - | - | 6 | 0 | 3 | 0 | - | - |
| cumul | 2025 | 3493 | 6576 | 2620 | 1030 | 1345 | 2922 | 4161 | 3596 |

*1 = Cinzana, 12 sep 1992 ; 2 = Cinzana, 21 sep 1992 ; 3 = N°Tarla, 30 sep 1992 ; 4 = N°Tarla, 5 oct 1992 ; 5 = Cinzana, 19 oct 1992, P₀ ; 6 = Cinzana, 26 oct 1992, P₀ ; 7 = Cinzana, 30 oct 1992, P₂₄₀ ; 8 = Cinzana, 5 nov 1992, P₂₀₀ ; 9 = Cinzana, 9 nov 1992, P₀.

correctif pour estimer la biomasse racinaire. Le **tableau 3** (colonnes 8 et 9) montre que la quantité de grosses racines est proportionnellement faible et que celles-ci se cantonnent dans les premiers 20 cm du sol. Les racines fines de *S. hamata* descendent jusqu'à la cuirasse (**Figure 5b**), et la distribution en profondeur est plus homogène que celle d'*A. gayanus*, et comparable à celle de *V. unguiculata*. La biomasse totale est élevée : 3 596 kg·ha⁻¹ sans apport de phosphore et 4 161 kg·ha⁻¹ pour le traitement avec 200 kg de P₂O₅.

Densité du système racinaire

Pour évaluer la densité des systèmes racinaires on a mesuré les longueurs cumulées de racines par litre de sol ; on s'est limité aux racines fines, parce que le rôle des grosses racines dans l'absorption de l'eau et des éléments nutritifs est considéré comme négligeable. La conversion des données brutes en valeurs moyennes de densité pose le même problème que l'extrapolation de la biomasse racinaire à cause de la variabilité spatiale.

Comme constaté dans le cas de la biomasse, les corrections à apporter sont grandes pour *A. gayanus*, du fait de l'écartement de 80 × 80 cm entre plants. Pour obtenir une estimation de la densité racinaire d'*A. gayanus*, nous avons appliqué comme facteur correctif le rapport biomasse corrigée / biomasse non-corrigée. Pour *V. unguiculata*, une approche similaire a été adoptée ; en tenant compte du fait que la densité moyenne de la couche 0–10 cm a été réduite de 25 %, et que celle de la couche 10–20 cm a été réduite de 12,5 %. Pour *S. hamata* aucune correction n'a été effectuée. Ces densités racinaires estimées d'après les données brutes sont indiquées au **tableau 4**.

Les distributions de la densité racinaire sont représentées à la **figure 6**. Pour *A. gayanus* à Cinzana (fosses 1 et 2), on constate que les densités sont faibles, mais ce paramètre diminue moins fort avec la profondeur que la biomasse racinaire. Ceci implique que la longueur spécifique (qui exprime la densité racinaire par unité de biomasse racinaire) s'accroît en direction des couches plus profondes, c'est-à-dire que le diamètre des racines diminue, leur permettant ainsi d'exploiter le sol de manière plus intensive. Chez *V. unguiculata*, la densité racinaire du traitement avec apport de phosphore (fosse 7) est supérieure à celles des témoins sans P (fosses 5 et 6). Pour *S. hamata* (fosses 8 et 9), on remarque des densités racinaires élevées dans les couches supérieures et une diminution de la densité en profondeur moins prononcée que pour les autres cultures. Cela implique que la longueur spécifique s'accroît à mesure que les couches explorées sont plus profondes.

Longueur spécifique des racines

Les données brutes sur la biomasse et la densité racinaire permettent d'évaluer la longueur spécifique moyenne par couche pour les différentes fosses (**Tableau 5**). Il est évident que pour *A. gayanus* et *S. hamata*, la longueur spécifique augmente en direction des couches plus profondes. Pour *V. unguiculata*, la variabilité de la longueur spécifique entre les couches est grande, sans qu'une tendance nette apparaisse.

DISCUSSION

Biomasse racinaire d'*Andropogon gayanus*

Le profil d'enracinement des végétaux présente un intérêt évident dans le cadre d'une meilleure compréhension de l'utilisation des éléments nutritifs disponibles pour une végétation naturelle ou une culture. Dans l'estimation de la biomasse racinaire, il n'est pourtant pas nécessaire de réaliser un prélèvement sur toute la profondeur de l'enracinement ; on peut aussi se limiter aux couches superficielles. Pour *A. gayanus*, environ 90 % de la biomasse racinaire se trouvent dans les couches superficielles. On a constaté que les différences en matière de biomasse racinaire sont importantes entre deux répétitions (**Tableau 3**) : la différence entre les fosses 1 et 2 (*A. gayanus* à Cinzana) atteint 72 % ; pour les fosses 3 et 4 (*A. gayanus* à N'Tarla), la différence entre les sites de prélèvement atteint 151 %. L'explication la plus plausible peut être liée à l'âge de la population de N'Tarla (45 ans) qui a été assimilée à une population naturelle. Comme pour la majeure partie des populations végétales naturelles, la distribution de la biomasse racinaire est vraisemblablement de type "Poisson" au lieu d'être homogène. En outre, la vigueur des différents pieds n'est pas comparable au sein d'une population naturelle du fait de la compétition et de la micro-variabilité du terrain. Il est même rare de trouver côte à côte deux pieds de même taille, ce qui remet en cause l'hypothèse de la symétrie radiale.

Si l'intérêt principal de la méthode des monolithes réside dans la détermination très précise, non seulement de la biomasse racinaire mais aussi d'autres caractéristiques des racines telles que la longueur spécifique et la distribution de la densité racinaire, cette méthodologie présente comme défaut de ne pas prendre en compte un volume bien représentatif de la culture. Cela a d'ailleurs pu être confirmé par une autre méthodologie, permettant de prélever un volume supérieur en considérant plusieurs pieds à la fois. Cette autre méthode ("méthode des blocs") fournit des

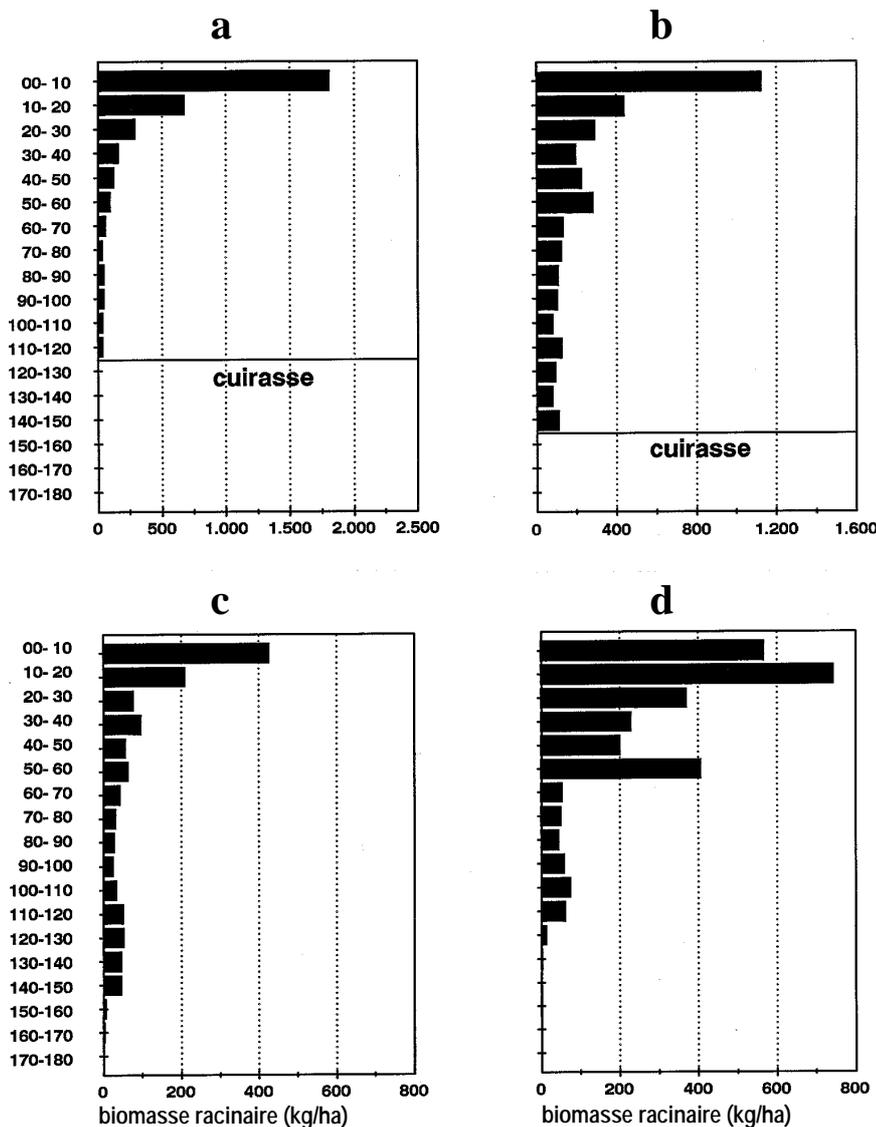


Figure 5. Distribution de la biomasse racinaire, site de Cinzana.

a : *Andropogon gayanus*, 21 sep 1992 ;
b : *Stylosanthes hamata*, 9 nov 1992, P₀ ;
c : *Vigna unguiculata*, 26 oct 1992, P₀ ;
d : *Vigna unguiculata*, 30 oct 1992, P₂₄₀ —
 Distribution of the root biomass along the soil profile, site of Cinzana.

données beaucoup plus représentatives (Traoré, 1996), mais ne permet pas de déterminer la distribution tridimensionnelle des racines. Cependant, la méthode des blocs a démontré que la biomasse racinaire à la fin du cycle est de l'ordre de 4 t·ha⁻¹ à N'Tarla, et de l'ordre de 5 t·ha⁻¹ à Cinzana (Traoré, 1996). Ceci implique qu'avec les échantillons de monolithe à Cinzana, la biomasse racinaire a été sous-estimée tandis qu'à N'Tarla, la biomasse se situe entre les deux répétitions de monolithe.

Les difficultés d'estimation apparaissent principalement pour les couches supérieures. Pour les couches profondes, on constate que la distribution latérale est approximativement uniforme. On observe à Cinzana que les racines descendent jusqu'au niveau de la cuirasse ; par contre, à N'Tarla, les racines descendent plus profondément. Et ceci même lorsque les biomasses en profondeur sont très faibles. La quantité et la distribution de la biomasse à N'Tarla sont comparables aux données de Breman (1982)

issues des expérimentations de Sotuba (Bamako), avec une pluviométrie comparable à celle de N'Tarla. À Cinzana et N'Tarla, les biomasses aériennes d'*A. gayanus* ont été estimées à 8 et 12 t·ha⁻¹ (Traoré, 1996) ; les rapports biomasse racinaire/biomasse aérienne sont par ailleurs de 1/1,6 pour Cinzana, et de 1/3 pour N'Tarla. La culture d'*A. gayanus* à Cinzana est très jeune comparativement à celle de N'Tarla, ce qui nous amène à supposer que pendant les premières années de croissance, le développement du système racinaire est favorisé.

Les biomasses racinaires mesurées peuvent être considérées comme des apports de matière organique au sol. Pour *A. gayanus* à N'Tarla, la production de biomasse racinaire est de l'ordre de 4 t·ha⁻¹ par an, la plupart des racines étant concentrées dans les couches superficielles. C'est dans les premiers 60 cm du sol que l'on trouve aussi une teneur en matière organique assez élevée atteignant 0,57 % (% C/0,58). En ce qui concerne la matière organique à N'Tarla, on peut dire

Tableau 4. Densité racinaire (cm par cm³) après réalisation des corrections pour la variabilité spatiale — *Root density distribution along the soil profile (cm per cm³); data of the upper layers are adapted to account for spatial variability of root distribution.*

| N° de fosse* | <i>Andropogon gayanus</i> | | | | <i>Vigna unguiculata</i> | | | <i>Stylosanthes hamata</i> | |
|--------------|---------------------------|------|------|------|--------------------------|------|------|----------------------------|------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| 00–10 | 0,50 | 1,50 | 1,81 | 1,00 | 1,20 | 1,06 | 0,89 | 3,13 | 2,23 |
| 10–20 | 0,31 | 0,51 | 1,21 | 0,73 | 0,84 | 0,63 | 1,87 | 1,45 | 0,96 |
| 20–30 | 0,33 | 0,48 | 0,53 | 0,45 | 0,39 | 0,29 | 1,11 | 0,77 | 0,90 |
| 30–40 | 0,22 | 0,33 | 0,25 | 0,15 | 0,11 | 0,23 | 0,77 | 0,84 | 0,48 |
| 40–50 | 0,19 | 0,33 | 0,14 | 0,11 | 0,14 | 0,16 | 0,58 | 0,81 | 0,69 |
| 50–60 | 0,22 | 0,28 | 0,10 | 0,17 | 0,04 | 0,24 | 0,98 | 1,45 | 0,93 |
| 60–70 | 0,13 | 0,17 | 0,06 | 0,04 | 0,04 | 0,17 | 0,29 | 0,77 | 0,79 |
| 70–80 | 0,14 | 0,09 | 0,02 | 0,02 | 0,03 | 0,06 | 0,24 | 0,60 | 0,80 |
| 80–90 | 0,14 | 0,08 | 0,03 | 0,04 | 0,04 | 0,07 | 0,22 | 0,48 | 0,62 |
| 90–100 | 0,09 | 0,12 | 0,01 | 0,04 | 0,04 | 0,10 | 0,26 | 0,43 | 0,47 |
| 100–110 | 0,12 | 0,14 | 0,01 | 0,04 | 0,05 | 0,16 | 0,39 | 0,31 | 0,39 |
| 110–120 | 0,18 | 0,17 | 0,01 | 0,03 | 0,08 | 0,20 | 0,27 | 0,56 | 0,40 |
| 120–130 | - | - | 0,02 | 0,05 | 0,03 | 0,18 | 0,05 | 0,29 | 0,37 |
| 130–140 | - | - | 0,01 | 0,06 | 0,00 | 0,16 | 0,02 | 0,21 | 0,50 |
| 140–150 | - | - | 0,02 | 0,04 | 0,01 | 0,10 | 0,03 | - | 0,66 |
| 150–160 | - | - | 0,01 | 0,07 | 0,01 | 0,05 | 0,00 | - | - |
| 160–170 | - | - | 0,01 | 0,06 | 0,00 | 0,01 | 0,00 | - | - |
| 170–180 | - | - | 0,00 | 0,02 | 0,00 | 0,03 | 0,00 | - | - |

*1 = Cinzana, 12 sep 1992 ; 2 = Cinzana, 21 sep 1992 ; 3 = N'Tarla, 30 sep 1992 ; 4 = N'Tarla, 5 oct 1992 ; 5 = Cinzana, 19 oct 1992, P₀ ; 6 = Cinzana, 26 oct 1992, P₀ ; 7 = Cinzana, 30 oct 1992, P₂₄₀ ; 8 = Cinzana, 5 nov 1992, P₂₀₀ ; 9 = Cinzana, 9 nov 1992, P₀.

que le sol se trouve dans une situation d'équilibre au terme de 45 ans de présence d'*A. gayanus* ; la minéralisation de la matière organique d'origine racinaire est compensée par un nouvel apport de matière organique des racines. En ce qui concerne le bilan d'azote, on peut noter un déséquilibre : l'apport d'azote par la biomasse racinaire se situe à 25 kg·ha⁻¹ pour une culture non fertilisée (Traoré, 1996), et à 50 kg·ha⁻¹ pour une culture fertilisée. Or, la quantité d'azote absorbé par la biomasse aérienne est respectivement de 59 et 105 kg·ha⁻¹ selon qu'il y a eu ou non fertilisation. Cela signifie que sans apport d'engrais, toute forme d'exploitation quelle qu'elle soit réduit le stock d'azote à long terme. Si l'on applique les teneurs en azote du sol indiquées au **tableau 1**, on remarque que le stock d'azote dans la couche 0–180 cm atteint 4 800 kg·ha⁻¹ ; ceci implique que l'exploitation sans apport d'engrais risque d'épuiser le stock d'azote du sol ainsi que de réduire à la longue la teneur en matière organique et la productivité du sol.

Biomasse racinaire de *Vigna unguiculata*

La légumineuse annuelle *V. unguiculata* a été plantée à distance fixe (40 × 80 cm) sur une parcelle homogène. De ce fait, la compétition est comparable d'un

pied à l'autre et la vigueur des différents pieds est identique. On constate d'ailleurs que la différence entre la biomasse racinaire pour les fosses 5 et 6 atteint 31 %, c'est-à-dire beaucoup moins que pour *A. gayanus*. Pour *A. gayanus*, environ 90 % de la biomasse racinaire se trouvent dans les premiers 60 cm du profil. Ce pourcentage est moindre pour *V. unguiculata* parce que la distribution verticale dans le profil est plus homogène. Les biomasses aériennes de *V. unguiculata* étaient de 4,22 t·ha⁻¹ pour le traitement sans apport de P (fosses 5 et 6), et de 4,87 t·ha⁻¹ pour le traitement avec P (données non publiées). Par contre, le rapport biomasse racinaire/biomasse aérienne est d'environ 1/3,5 sans apport de P, et atteint 1/1,7 avec apport de phosphore. L'apport de phosphore profite surtout à la production de racines et pratiquement pas à la biomasse aérienne.

Biomasse racinaire de *Stylosanthes hamata*

L'absence de répétitions pour *S. hamata* ne permet pas d'évaluer la variabilité des données mais on peut supposer que cette variabilité est faible vu l'homogénéité de la culture et la forte densité de celle-ci. Les quantités de biomasse racinaire produite par *S. hamata* sont importantes : 3 596 kg·ha⁻¹ sans apport de P, et 4 161 kg·ha⁻¹ avec apport de 200 kg de

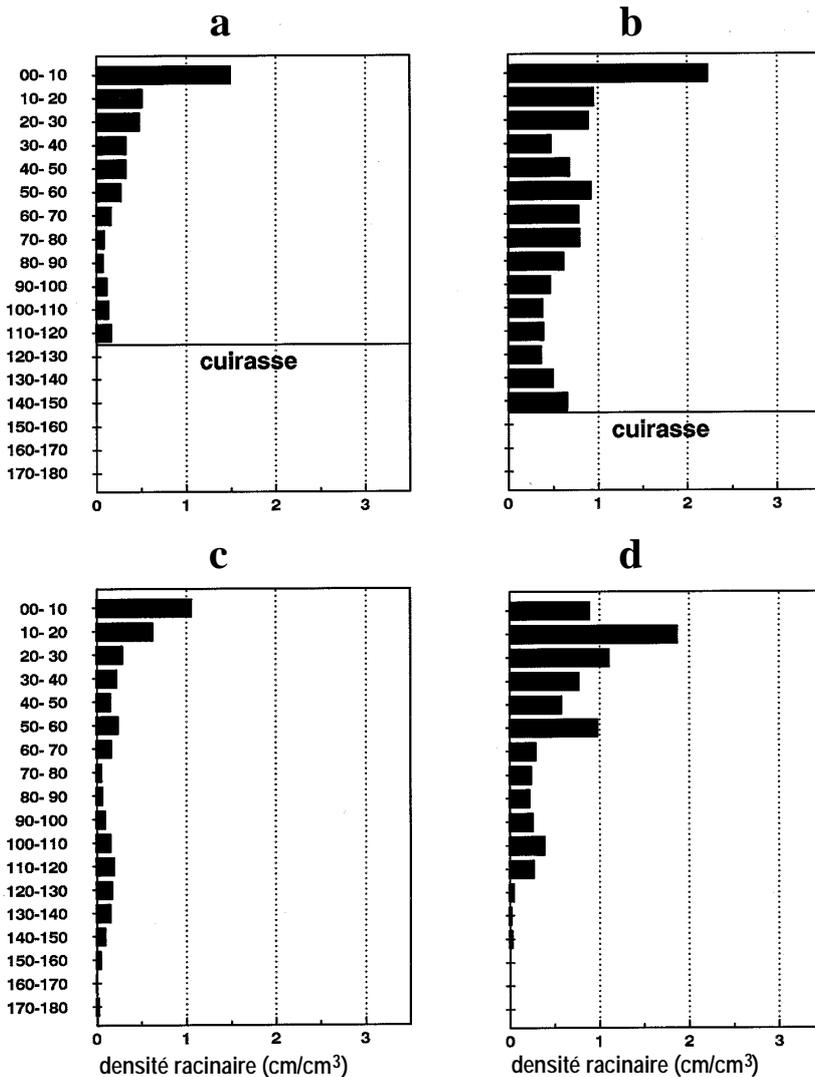


Figure 6. Distribution de la densité racinaire, site de Cinzana.

a : *Andropogon gayanus*, 21 sep 1992 ;
b : *Stylosanthes hamata*, 9 nov 1992, P₀ ;
c : *Vigna unguiculata*, 26 oct 1992, P₀ ;
d : *Vigna unguiculata*, 30 oct 1992, P₂₄₀
 — Distribution of the root density along the soil profile, site of Cinzana.

P₂O₅-ha⁻¹. Les biomasses aériennes atteignaient 8,36 et 10,86 t·ha⁻¹, aboutissant respectivement à des rapports biomasse racinaire/biomasse aérienne de 1/2,3 et 1/2,6 pour les traitements P₀ et P₂₀₀. La distribution de la biomasse ressemble à celle de *V. unguiculata*. La biomasse est distribuée jusqu'au niveau de la cuirasse.

Densité du système racinaire et longueur spécifique des racines

Ce n'est pas la biomasse racinaire mais principalement la densité d'enracinement et la superficie du système racinaire qui sont des paramètres importants dans l'absorption de l'eau et des éléments nutritifs (De Willigen, Van Noordwijk, 1987). À cet effet, les racines fines ont un rôle prédominant : plus le diamètre des racines est petit, plus leur superficie spécifique est grande. Comparées aux données rassemblées par De Willigen et Van Noordwijk (1987) sur la longueur spécifique, les valeurs observées dans

la présente étude sont du même ordre de grandeur. On constate également que la variabilité de la longueur spécifique entre différentes fosses d'une même culture est bien moindre que celle de la biomasse et de la densité racinaire. Pour *A. gayanus* et *S. hamata*, la longueur spécifique (mètres de racines par gramme de racines) s'accroît avec la profondeur (**Tableau 5**). Cela signifie que leur diamètre diminue et que la superficie du système racinaire augmente pour mieux exploiter les couches profondes malgré une biomasse racinaire faible en profondeur.

CONCLUSION

La méthode d'étude du système racinaire suivant la méthode du monolithe permet d'analyser plusieurs caractéristiques des racines sur toute la profondeur du profil. La biomasse racinaire produite par *A. gayanus* planté était de 4 à 5 t·ha⁻¹ et les biomasses aériennes

Tableau 5. Longueur spécifique moyenne ($m \cdot g^{-1}$) des racines en fonction de la profondeur — *Mean specific length ($m \cdot g^{-1}$) of roots along the soil profile.*

| N° de fosse* | <i>Andropogon gayanus</i> | | | | <i>Vigna unguiculata</i> | | | <i>Stylosanthes hamata</i> | |
|--------------|---------------------------|------|------|------|--------------------------|------|-------|----------------------------|------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| 00–10 | 15,9 | 18,9 | 38,1 | 27,1 | 69,6 | 64,4 | 29,6 | 38,3 | 37,5 |
| 10–20 | 33,1 | 18,6 | 16,9 | 17,5 | 68,5 | 57,2 | 44,0 | 33,4 | 35,0 |
| 20–30 | 31,9 | 23,6 | 31,5 | 28,4 | 69,8 | 57,6 | 72,7 | 45,6 | 48,3 |
| 30–40 | 50,4 | 33,0 | 49,3 | 46,1 | 52,3 | 55,0 | 57,4 | 58,2 | 39,4 |
| 40–50 | 42,1 | 36,8 | 42,3 | 24,0 | 47,1 | 55,2 | 57,5 | 55,9 | 51,7 |
| 50–60 | 70,8 | 40,3 | 38,1 | 39,4 | 10,8 | 46,4 | 41,3 | 48,1 | 54,5 |
| 60–70 | 45,0 | 40,0 | 41,9 | 68,1 | 64,7 | 63,6 | 73,2 | 73,2 | 90,1 |
| 70–80 | 58,8 | 30,2 | 28,4 | 32,0 | 19,2 | 40,4 | 72,2 | 69,7 | 92,1 |
| 80–90 | 64,1 | 37,1 | 25,4 | 47,0 | 32,3 | 43,0 | 57,1 | 64,8 | 78,3 |
| 90–100 | 52,7 | 38,5 | 15,2 | 29,3 | 22,4 | 60,2 | 101,8 | 69,7 | 75,0 |
| 100–110 | 59,2 | 41,1 | 43,7 | 31,4 | 56,4 | 51,0 | 76,7 | 70,9 | 59,2 |
| 110–120 | 40,9 | 41,3 | 37,3 | 70,8 | 48,9 | 54,7 | 70,1 | 82,4 | 60,0 |
| 120–130 | - | - | 72,5 | 95,4 | 44,1 | 65,6 | 52,3 | 91,3 | 57,1 |
| 130–140 | - | - | 31,6 | 85,5 | 16,4 | 43,9 | 19,7 | 101,8 | 94,3 |
| 140–150 | - | - | 53,0 | 69,5 | - | 45,0 | 81,3 | - | - |
| 150–160 | - | - | 29,0 | 53,9 | 36,5 | 73,6 | 13,5 | - | - |
| 160–170 | - | - | 47,1 | 65,4 | 49,2 | 42,8 | - | - | - |
| 170–180 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |

*1 = Cinzana, 12 sep 1992 ; 2 = Cinzana, 21 sep 1992 ; 3 = N'Tarla, 30 sep 1992 ; 4 = N'Tarla, 5 oct 1992 ; 5 = Cinzana, 19 oct 1992, P₀ ; 6 = Cinzana, 26 oct 1992, P₀ ; 7 = Cinzana, 30 oct 1992, P₂₄₀ ; 8 = Cinzana, 5 nov 1992, P₂₀₀ ; 9 = Cinzana, 9 nov 1992, P₀.

atteignaient 8 à 12 t·ha⁻¹. Quatre-vingt dix pour cent de la biomasse racinaire sont concentrés dans la couche 0–60 cm bien que la profondeur d'enracinement atteigne 180 cm et la biomasse racinaire décroît de façon exponentielle avec la profondeur, tandis que la diminution de la densité racinaire est faible. Il en résulte une augmentation de la longueur spécifique en profondeur. La biomasse racinaire de *V. unguiculata* atteignait 1 118 kg·ha⁻¹ sans apport de phosphore, contre 2 922 kg·ha⁻¹ avec apport de phosphore. L'effet du phosphore sur la biomasse aérienne était néanmoins négligeable et il n'a pas été observé de réduction de la longueur spécifique. La biomasse racinaire de *S. hamata* ne réagit pas fortement à l'apport de P : 3 596 kg·ha⁻¹ sans apport, et 4 161 kg·ha⁻¹ avec une dose non-limitative. Les biomasses aériennes respectives étaient de 8 360 kg·ha⁻¹ et 10 860 kg·ha⁻¹. La densité racinaire est élevée pour la totalité du profil, et la longueur spécifique s'accroît de 35 m·g⁻¹ pour la couche 0–20 cm à 100 m·g⁻¹ pour la couche 130–140 cm, permettant à *S. hamata* d'exploiter efficacement l'eau et les éléments nutritifs.

Après 45 ans de présence d'*A. gayanus*, la minéralisation de la matière organique issue des racines est compensée par l'apport de nouvelle matière organique des racines. En ce qui concerne le bilan d'azote, on peut noter un déséquilibre : la quantité

d'azote absorbé par la biomasse aérienne dépasse l'apport d'azote fourni par la biomasse racinaire. Cela signifie que sans apport d'engrais, toute forme d'exploitation quelle qu'elle soit réduit le stock d'azote à long terme. L'apport de biomasse racinaire par les légumineuses *S. hamata* et *V. unguiculata* est d'une autre nature du fait de leur capacité à fixer l'azote et de ce que la minéralisation des racines peut contribuer à la disponibilité d'azote à l'intérieur du sol. Cependant, seule une bonne teneur en phosphore assure une fixation d'azote sans limitation. Ceci démontre la nécessité d'un apport en phosphore pour pouvoir profiter de la plus-value des légumineuses.

Remerciements

Les recherches décrites dans cette publication ont été réalisées dans le cadre du Projet PSS (Production soudano-sahélienne) qui constitue une collaboration scientifique entre l'Institut d'Économie Rurale (IER Bamako, Mali), l'Institut de Biologie Agronomique et de Fertilité du Sol (AB-DLO Wageningen, Pays-Bas), et l'Université Agronomique de Wageningen – collaboration dont le financement est assuré par le Ministère des Affaires Étrangères des Pays-Bas. Nous remercions Mr Peter Uithol pour sa contribution à la rédaction finale, et les lecteurs de "Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement" pour leurs corrections détaillées.

Bibliographie

- Böhm W. (1979). *Methods of studying root systems*. Berlin : Springer Verlag.
- Breman H. (1982). La production actuelle des pâturages naturels liée aux facteurs naturels et aux facteurs anthropiques. In Penning de Vries FWT., Djitéye MA. *La productivité des pâturages sahéliens. Une étude des sols, des végétations et de l'exploitation de cette ressource naturelle*. Wageningen, Pays-Bas : Pudoc. Agric. Res. Rep. 918., p. 284–295.
- De Willigen P., Van Noordwijk M. (1987). Roots, plant production and nutrient use efficiency. PhD Thesis. Agricultural University Wageningen, The Netherlands.
- Groot JJR., Koné D., Traoré M., Kamissoko M. (1995). *Description du système racinaire de l'Andropogon gayanus, du Vigna unguiculata et du Stylosanthes hamata en zone soudano-sahélienne*. Rapports PSS n°8. Wageningen, Pays-Bas : AB-DLO ; Bamako, Mali : IER.
- 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**, p. 53–57.
- Keita B., Diallo D., Dioni L. (1981). *Étude pédologique de la Station de Recherche Agronomique de Cinzana*. Bamako, Mali : SRCVO.
- Keita B. (1990). *Reconnaissance des sols et représentativité de quelques Stations de Recherche à Mali-Sud, Longorola, N'Tarla et Cinzana*. Bamako, Mali : DRA - SRCVO.
- Newman EI. (1966). A method for estimating the total length of roots in a sample. *J. Appl. Ecol.* **3**, p. 139–145.
- Penning de Vries FWT., Djitéye MA. (1982). *La productivité des pâturages sahéliens. Une étude des sols, des végétations et de l'exploitation de cette ressource naturelle*. Agric. Res. Rep. 918, Wageningen, Pays-Bas : Pudoc.
- Schuurman JJ., Goedewaagen MAJ. (1971). *Methods for the examination of root systems and roots*. 2nd ed. Wageningen, The Netherlands : Pudoc.
- Tennant D. (1975). A test of a modified line intersect method of estimating root length. *J. Ecol.* **63**, p. 995–1001.
- Traoré M. (1996) Utilisation des éléments nutritifs par une graminée pérenne : *Andropogon gayanus*. Thèse de Doctorat. ISFRA, Bamako; IER, Bamako ; DAN-UAW, Wageningen ; AB-DLO, Wageningen/Haren, Pays-Bas.
- Van Noordwijk M., Floris J., de Jager A. (1985). Sampling schemes for estimating root density distribution in cropped fields. *Neth. J. Agric. Sci.* **33**, p. 241–262.
- Van Noordwijk M. (1993). Roots: length, biomass, production and mortality. In Anderson JM., Ingram JSL. *Tropical soil biology and fertility. A handbook of methods*. Wallingford, UK : CAB International, p. 132–144.

(16 réf.)