



PROJET Grant GIZ 81282210

Impact de *Cajanus cajan* sur les propriétés physico-chimiques et biologiques du sol, exploration racinaire et fixation symbiotique comme processus marquants pour le succès des pratiques agroécologiques dans la région Androy à Madagascar

RAPPORT FINAL

Auteurs : Sarah Rakotozafy, Bruno Bordron, Jean-Pierre Bouillet, Malaladiana Razafindrakoto

Table des matières

1. Introduction.....	3
2. Contexte et problématique de l'étude.....	4
3. Objectifs de l'étude	5
4. Méthodologie générale	6
4.1 Site de travail	6
4.2 Intégration de l'étude au niveau local	6
4.3 Choix des parcelles d'étude.....	7
4.4 Techniques cultures recommandées par le CTAS.....	9
4.5 Historiques culturales des parcelles étudiées	10
5. Partie 1 : Etude sur l'impact des techniques agroécologiques à base de cajanus sur la qualité biologique du sol	11
5.1 Parcelles sélectionnées	11
5.2 Méthodologie.....	12
5.3 Résultats	14
5.3.1 Abondance de la macrofaune	14
5.3.2 Diversité de la macrofaune	15
5.3.3 Groupe fonctionnel de la macrofaune	19
5.4 Activité biologique	21
5.5 Conclusion	22
6. Partie 2 : Etude sur l'impact des techniques agroécologiques à base de cajanus sur les propriétés physico-chimiques du sol.....	23
6.1 Parcelles sélectionnées	23
6.2 Méthodologie de prélèvement	24
6.3 Résultats et Analyses.....	25
6.3.1 Densité apparente du sol	25
6.3.2 Impact du système sur le pH du sol.....	26
6.3.3 Impact du système sur le Carbone organique (CO)	27
6.3.4 Impact du système sur l'azote total (N _{tot}).....	29
6.3.5 Impact du système sur le phosphore assimilable (P _{ass}).....	31
6.3.6 Impact du système sur le C/N du sol.....	33
6.3.7 Impact du système sur le potassium (K)	34
6.3.8 Impact du système sur le calcium (Ca)	36
6.3.9 Impact du système sur le sodium (Na).....	37

6.3.10 Impact du système sur le stock de carbone (COS), stock d'azote total (NOS) 39

6.4	Conclusion	42
7.	Partie 3 : Etude sur la fixation symbiotique de l'azote atmosphérique N ₂ par le <i>Cajanus cajan</i>	43
7.1	Parcelles sélectionnées	43
7.2	Méthodologie de marquage	43
7.3	Mode de prélèvement des feuilles	44
7.4	Analyse des feuilles	45
7.5	Résultats	46
7.6	Conclusion	49
8.	Partie 4 : Exploration racinaire en profondeur de <i>Cajanus cajan</i>	50
8.1	Parcelles sélectionnées	50
8.2	Mode de prélèvement des sols	51
8.3	Mode de séparation des racines fines au sol	52
8.4	Résultats	52
9.	Partie 5 : Quantification de la biomasse aérienne et racinaire du <i>Cajanus cajan</i>	54
9.1	Parcelles sélectionnées	54
9.2	Inventaire des arbustes de cajanus	54
9.3	Echantillonnage des arbustes	55
9.4	Résultats	56
10.	Perspectives d'étude	58
11.	Conclusion générale de l'étude	59
12.	Bibliographie	60

Liste des photos

Photo 1	: Réunion communautaire dans le fokontany Marofoty central	7
Photo 2	: Types parcelles visitées (a : parcelles dégradées ; b : mini-forêt ; c : cajanus en bande)	8
Photo 3	: Marquage avec arrosoir, a : parcelle de cultures associées de cajanus et manioc ; b : parcelle pure de manioc	44
Photo 4	: Utilisation de tarière pour le prélèvement des sols	51
Photo 5	: Formation rocheuse dans les profondeurs du sol	52
Photo 6	: Echantillonnage de la biomasse du cajanus	55

Liste des figures

Figure 1 : Zone de travail, BAE Karoke Mahandrorano et parcelles témoins	8
Figure 2 : Techniques recommandées par le CTAS	9
Figure 3 : Techniques observées dans les parcelles	10
Figure 4 : Application de la méthode TSBF (Tropical Soil Biology and Fertility)	12
Figure 5 : Test bait lamina	13
Figure 6 : Nombre d'espèces par parcelle	15
Figure 7 : Densité de la macrofaune suivant l'espèce dans la profondeur 0-10 cm	16
Figure 8 : Densité de la macrofaune suivant l'espèce dans la profondeur 10-20 cm	16
Figure 9 : Densité de la macrofaune suivant l'espèce dans la profondeur 20-30 cm	17
Figure 10 : Abondance relative de la macrofaune	18
Figure 11 : Groupe fonctionnel par parcelles	20
Figure 12 : Activité alimentaire de la macrofaune en fonction des substrats à base de cajanus (substrat 1) ou de pois de lima et maïs (substrat 2)	22
Figure 13 : Mode de prélèvement des sols dans les parcelles de mini-forêt, parcelles monocultures et parcelles témoins	24
Figure 14 : Mode de prélèvement dans les parcelles de cajanus en bande	25
Figure 15 : Moyenne du carbone organique sur la profondeur 0-30 cm	28
Figure 16 : Teneur en azote total sur la profondeur 0-30 cm	30
Figure 17 : Moyenne teneur en phosphore assimilable sur la profondeur 0-30 cm	32
Figure 18 : Moyenne teneur en potassium sur la profondeur 0-30 cm	35
Figure 19 : Moyenne teneur en calcium sur la profondeur 0-30 cm	37
Figure 20 : Moyenne teneur en sodium sur la profondeur 0-30 cm	38
Figure 21 : Stock COS sur la profondeur de 0-30 cm (exprimé en Mg C. ha ⁻¹)	39
Figure 22 : Stock de NOS sur la profondeur 0-30 cm (exprimé en Mg N. ha ⁻¹)	40
Figure 23 : Collecte du sol et des feuilles en fonction de la distance à la haie de cajanus et du sens de la pente dans les parcelles en bandes	44
Figure 24 : Carré de Voronoï, P1 et P4 sont les points de prélèvements	51

Liste des tableaux

Tableau 1 : Liste des traitements pour étude sur les paramètres biologiques	11
Tableau 2 : Nombre d'individus total répertoriés dans chaque parcelle étudiée (n = 4 par traitement)	14
Tableau 3 : Liste des traitements pour étude sur les paramètres physico-chimiques.....	23
Tableau 4: Moyenne de la densité apparente du sol par système (n=4).....	25
Tableau 5 : Valeur moyenne du pH	26
Tableau 6 : Valeur moyenne de la teneur en carbone organique (exprimée g/kg de sol) (n=4 par système).	27
Tableau 7 : Valeur moyenne de la teneur en azote total (exprimée en g/kg de sol)	29
Tableau 8 : Valeur moyenne de la teneur en Phosphore assimilable (P _{ass}) (exprimée en mg/kg de sol).....	31
Tableau 9 : Valeur moyenne du rapport C/N	33
Tableau 10 : Valeur moyenne de la teneur en potassium échangeable (exprimée en cmol ⁺ /kg de sol)	34
Tableau 11 : Valeur moyenne de la teneur en calcium (exprimée en cmol ⁺ /kg de sol).....	36
Tableau 12 : Valeur moyenne de la teneur en sodium (exprimée en cmol ⁺ /kg de sol).....	37
Tableau 13 : Moyenne de stock COS par pratique sur la profondeur 0-30 cm.....	39
Tableau 14 : Moyenne de stock Nos par pratique sur la profondeur 0-30 cm.....	41
Tableau 15 : Pourcentage d'azote dérivé de la fixation atmosphérique (%Ndfa) dans les parcelles avec cajanus	46
Tableau 16 : Apport, sur 2 ans, d'azote dérivé de la fixation atmosphérique (exprimée en g N/plant).....	47
Tableau 17 : Pourcentage d'azote dérivé du transfert du cajanus vers le manioc (%Ndft) dans les parcelles associées de cajanus+manioc	48
Tableau 18 : Liste des systèmes pour la collecte de racines fines de cajanus.....	50
Tableau 19 : Profondeur maximale d'enracinement du cajanus	52
Tableau 20 : Liste des systèmes pour les biomasses destructives de cajanus	54
Tableau 21 : Biomasse de cajanus.....	56



LISTE DES ABREVIATIONS

BAE	: bloc agroécologique
C	: carbone
Ca	: calcium
CO	: carbone organique
COS	: carbone organique du sol
DRAE	: Direction Régionale de l'Agriculture et de l'Élevage
K	: potassium
KM	: Komitin'ny mpamboly
N	: azote
N_{tot}	: azote total
Na	: sodium
P	: phosphore
P_{ass}	: phosphore assimilable
TSBF	: Tropical Soil Biology and Fertility

Résumé

Face aux défis climatiques et environnementaux du Sud de Madagascar, tels que la sécheresse et l'érosion éolienne, le GRET et le CTAS ont mis en place des systèmes de blocs agroécologiques (BAE). Ces BAE sont des aménagements collectifs intégrant le *Cajanus cajan* sous la forme de mini-forêts ou de haies visant à améliorer la fertilité des sols et à renforcer la résilience des systèmes agricoles.

Depuis leurs mises en place en 2014, ces systèmes ont reçu un retour favorable de la part des producteurs, qui ont constaté une amélioration de la fertilité des sols et une meilleure protection des sols contre l'érosion éolienne. Une étude préliminaire menée en 2019 a suggéré un potentiel d'amélioration de la qualité du sol grâce aux mini-forêts de cajanus, sans toutefois établir formellement leur impact positif sur les propriétés du sol.

Dans ce contexte, une étude financée par l'action Prosilience et menée par le CIRAD, en collaboration avec le CTAS, les autorités locales et les producteurs, a cherché à évaluer l'efficacité de ces systèmes agroécologiques intégrant *Cajanus cajan*. L'étude s'est focalisée sur l'impact de *Cajanus cajan* sur les propriétés physico-chimiques et biologiques du sol, en examinant notamment l'exploration racinaire et la fixation symbiotique.

Afin de limiter les biais liés à l'hétérogénéité des sols, un seul bloc agroécologique, le BAE Karoke Mahandrorano (commune de Tsimananada), a été sélectionné pour la réalisation de l'étude. Des parcelles de mini-forêts et de cajanus en bande, âgées de 1 an et 2 ans, ainsi que des parcelles de monocultures, ont été comparées à des parcelles de jachères traditionnelles (témoin, parcelles dégradées). Des tests ont été effectués et des échantillons de sol, de macrofaune et de plantes ont été analysés pour évaluer l'impact de ces pratiques et mieux comprendre leur fonctionnement.

L'étude a confirmé l'impact positif des blocs agroécologiques, notamment des mini-forêts de cajanus, sur la biodiversité de la macrofaune du sol. En effet, les parcelles de mini-forêts âgées de 1 an et 2 ans présentent en moyenne deux fois plus d'individus que les parcelles dégradées et les monocultures.

De plus, les mini-forêts améliorent significativement la fertilité des sols. En effet, les parcelles âgées de 1 an présentent des teneurs en carbone, en azote et en phosphore nettement plus élevées que les parcelles témoins dégradées. Ainsi, la teneur en carbone est de 13,77 g/kg de sol dans les mini-forêts contre seulement 3,96 g/kg de sol dans les parcelles dégradées. Il en va de même pour l'azote (1,4 g/kg contre 0,39 g/kg) et le phosphore (5,09 mg/kg contre 3,06 mg/kg). Les stocks moyens de carbone organique et d'azote des sols dans les mini-forêts âgées de 1 et 2 ans sont les plus importants avec respectivement 44,02 Mg C. ha⁻¹ et 4,47 Mg N. ha⁻¹. Les parcelles de cajanus en bande, âgées de 1 an et 2 ans, affichent des stocks intermédiaires de 24,49 Mg C. ha⁻¹ et 2,27 Mg N. ha⁻¹. Les parcelles dégradées présentent les valeurs les plus faibles, avec 17,84 Mg C. ha⁻¹ et 1,76 Mg N. ha⁻¹.

Le *Cajanus cajan* âgé de deux ans, qu'il soit planté en mini-forêts ou en bandes, présente une capacité de fixation de l'azote atmosphérique estimée à 100 %. Les systèmes en bande contribuent activement au maintien de la fertilité des sols en transférant cet azote aux cultures associées, comme le manioc. En effet, il a été démontré qu'entre 42 % et 72 % de l'azote présent dans les feuilles de manioc situés à environ 5 mètres d'une bande de *Cajanus cajan* provient de ce transfert.

Par ailleurs, la production de bois énergie par les cajanus âgés de deux ans est de 2878 kg/ha dans les parcelles de mini-forêts et varie de 680 à 798 kg/ha dans les parcelles en bande. Cette production représente un atout considérable dans une région confrontée à la déforestation et à une insuffisance de ressources ligneuses pour répondre aux besoins des populations.

La présence d'un horizon rocheux peu profond (entre 1, 5 et 2 mètres) dans le sol de la zone d'étude représente une contrainte physique pour le développement racinaire du *Cajanus cajan*. Il est donc nécessaire de tenir compte de cette limitation lors de l'élaboration de futures stratégies de reboisement.

En conclusion, cette étude met en évidence l'efficacité des pratiques agroécologiques basées sur le *Cajanus cajan* pour restaurer la fertilité des sols, améliorer la biodiversité de la macrofaune et renforcer la résilience des systèmes agricoles. Les mini-forêts, en particulier, se révèlent être une solution plus efficace que les techniques de jachères traditionnelles pour la restauration des parcelles dégradées. La diffusion à plus large échelle de ces pratiques agroécologiques dans la région est prometteuse pour une agriculture plus durable.

1. Introduction

La région Androy, située à l'extrême Sud de Madagascar est exposée à un type de climat tropical semi-aride accompagnée d'une forte érosion éolienne. Ce fléau environnemental défavorise les activités agricoles dans la région et accentue l'insécurité alimentaire de la population. Afin de freiner ce cycle d'appauvrissement, l'instauration d'une agriculture apte à s'ajuster à ces conditions climatiques représente une réponse pour réduire la pauvreté dans la région et renforcer la résilience au sein de la communauté locale. C'est dans cette optique que le GRET, le Centre technique agroécologique du Sud (CTAS) et ses partenaires ont élaboré la démarche d'aménagement collectif des blocs agroécologiques à partir de 2014 (Lhérieu et al. 2020). Un bloc agroécologique (BAE) est un aménagement physique et biologique collectif d'un seul tenant, d'une superficie initiale minimum de 10 hectares, à vocation nutritionnelle, productive et environnementale, présentant une forte diversité biologique étagée, allant des plantes rampantes jusqu'au grands arbres, et associant, pour créer un effet « oasis » protecteur contre les érosions éoliennes et pluviales, les parcelles contiguës de familles paysannes volontaires, issues d'un à plusieurs fokontany (villages ou hameaux). Ces aménagements sont réalisés par les paysans qui sont souvent appuyés techniquement par le CTAS et soutenus par différents projets, tels que l'Action ProSilence. Celle-ci, dans le cadre de ProSol avec un co-financement de l'Union européenne, est mise en œuvre par la Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ). Le projet se concentre sur la mise en œuvre à grande échelle des approches agroécologiques pour la protection et la réhabilitation durables et climato-intelligentes des sols à Madagascar ; ainsi que le renforcement de la transition agroécologique vers des systèmes agroalimentaires durables.

Dans cette perspective, une étude menée par le CIRAD en collaboration avec le CTAS, à la demande des principaux acteurs impliqués, a été réalisée pour évaluer l'efficacité des BAE. Cette étude porte notamment sur l'impact du *Cajanus cajan* sur les propriétés physico-chimiques et biologiques du sol, l'exploration racinaire et la fixation symbiotique du N₂ atmosphérique. L'objectif étant de comprendre comment ces systèmes peuvent se révéler durables et productifs, alors qu'ils sont établis dans des conditions écologiques potentiellement très défavorables (sécheresse marquée, sols pauvres, érosion éolienne et ensablement des parcelles agricoles, pas d'apport d'engrais minéraux et/ou organiques, ...) dans un contexte marqué par l'insécurité alimentaire et ainsi renforcer la résilience des populations.

2. Contexte et problématique de l'étude

Les BAE s'appuient sur les propriétés potentiellement bénéfiques du *Cajanus cajan* (pois d'angole ou *ambatry*) (Lhériteau et al. 2020), légumineuse arbustive, semi-pérenne et particulièrement adaptée aux zones semi-arides. Cette plante a de nombreux intérêts pour la région, car non seulement elle contribue à la nutrition mais aussi à la protection des sols contre l'érosion (Violas et al. 2018).

L'érosion des sols par un vent sec et violent, représente un des problèmes majeurs de la région, surtout dans les zones littorales de la région. Cela entraîne la dégradation de la couche superficielle des parcelles de cultures et la mise en péril de leur fertilité. Dans ce cadre, *Cajanus cajan* est utilisé sous différentes formes de cultures :

- En « mini-forêt » : cultivé en plein champ pour la restauration de la fertilité des parcelles ;
- En haies brise-vent : souvent en association avec d'autres cultures comme le maïs, le mil, le sorgho, le manioc, ou les cucurbitacées.

En 2019, une recherche a été menée sur l'impact des mini-forêts et haies de cajanus sur la santé des sols (*i.e.* capacité de restaurer les sols en termes de diversité et de fonctionnement) (Denier, 2019). Cette étude fait le constat d'un début d'amélioration de la qualité fonctionnelle et biologique des sols sous « mini forêts » de cajanus.

Toutefois, même si un certain nombre d'observations de terrain de ce système agricole semblent prometteuses, il est crucial d'évaluer son impact sur la fertilité des sols à long terme. Une analyse plus précise des propriétés physico-chimiques et biologiques des sols a donc été demandée par les différents partenaires afin de mieux orienter le choix des espèces et systèmes agroforestiers associant *Cajanus cajan* avec les différentes cultures agricoles pratiquées, à vulgariser auprès des producteurs.

Pourtant aucune étude n'a encore montré si de tels arrangements conduisent effectivement à un meilleur statut azoté des cultures associées. Par ailleurs, l'association d'une espèce fixatrice peut augmenter la disponibilité en phosphore minéral pour les cultures associées via la production de phosphatase, enzyme nécessaire à la minéralisation du P contenu dans la matière organique (Binkley et al., 2000 ; Houlton et al., 2008). L'amélioration de la fertilité des sols grâce à la fixation symbiotique de N₂ est aussi mentionnée comme un des avantages attendus à l'utilisation de *Cajanus cajan*. Une estimation chiffrée de l'impact de cette association sur le bilan de N et le fonctionnement azoté de l'écosystème doit participer à une meilleure connaissance des systèmes agroforestiers développés dans le Sud de Madagascar et leur potentiel développement dans d'autres régions de l'Ile.

Il convient également d'étudier le développement racinaire de cette plante afin de comprendre sa capacité à s'adapter et pousser dans cette zone.

Par ailleurs, les cajanus fournissant du bois de chauffe aux populations, il est très important de quantifier leur biomasse totale ligneuse (aérienne et souterraine). Ceci pour connaître dans quelle mesure cette biomasse répond aux besoins et peut se substituer aux prélèvements en forêt naturelle.

Les questions qui se posent sont :

- Les blocs agroécologiques améliorent-ils la fertilité des sols ?
- Quelle quantité d'azote est fixée par les cajanus et dans quelle mesure ceux-ci peuvent améliorer le statut azoté des cultures associées ?
- Le développement racinaire en profondeur du cajanus explique-t-il son adaptation aux conditions du milieu ?
- Quelle quantité de biomasse les cajanus peuvent-ils fournir pour être utilisés comme bois de chauffe ?

3. Objectifs de l'étude

L'objectif principal est de caractériser l'impact des différents systèmes agroécologiques à base de *Cajanus cajan* sur les propriétés physico-chimiques et biologiques des sols et mieux comprendre le fonctionnement de ces systèmes dans la restauration des sols de la partie Sud de Madagascar.

4. Méthodologie générale

4.1 Site de travail

L'étude se concentre dans un seul bloc agroécologique (BAE) afin de limiter la variabilité édaphique. Le BAE choisi est celui de Karoke Mahandrorano, situé dans la commune de Tsimananada. Ce bloc est le plus ancien et est considéré comme un bloc dynamique par la participation active des agriculteurs aux techniques agroécologiques vulgarisées, l'évolution du nombre d'agriculteurs concernés, les surfaces touchées et la dynamique d'expansion d'utilisation du *Cajanus cajan*.

4.2 Intégration de l'étude au niveau local

L'étude s'inscrit dans une démarche collaborative impliquant divers acteurs locaux. Les autorités locales (préfet de la Région, maire) et la DRAE ont facilité l'intégration de l'étude sur le terrain avec la signature d'une lettre d'introduction. Cette dernière a été présentée aux présidents des fokontany et des KM.

Par la suite, une réunion communautaire a été organisée avec les villageois et agriculteurs dans le BAE concerné, durant laquelle l'étude a été présentée en détail. Le but de cette réunion étant d'avoir leur approbation et les informer de leur implication dans la réalisation de l'étude.

Enfin, la participation active des producteurs a constitué un élément clé, leur implication ayant été essentielle pour recueillir et assurer les collectes de données. Cette collaboration garantit une intégration optimale de l'étude au sein de la communauté.

Les étapes suivies pour aboutir à l'intégration de l'étude au niveau des producteurs ont été les suivantes :

- Rencontre avec le Secrétaire Général de la Région qui a remis la lettre d'introduction, et présentation de l'étude au DRAE
- Rencontre avec l'adjoint au maire de la commune de Tsimananada
- Rencontre avec les KM pour organiser la réunion au village
- Réunion communautaire



Photo 1 : Réunion communautaire dans le fokontany Marofoty central

4.3 Choix des parcelles d'étude

Des visites dans les parcelles ont été effectuées avec un guide local, un KM qui connaissait les propriétaires de toutes les parcelles et peut facilement les identifier selon les critères recherchés. Les visites ont été axées sur les parcelles de cajanus en bande (ou haies de cajanus) âgées de 1 an, 2 ans et 3 ans ; les parcelles de mini-forêts âgées de 1 an, 2 ans et 3 ans, les parcelles n'ayant jamais été cultivées en cajanus et des parcelles abandonnées depuis 2 ou 3 ans.

Les parcelles de culture sont très hétérogènes. En effet, les cultures accompagnant le cajanus varient beaucoup d'une parcelle à une autre.

A la suite, en raison de leur similarité et de la forte mortalité des cajanus à partir de la 3^{ème} année, les parcelles en bandes et en mini-forêts de 3 ans ont été éliminées de la liste (cf. partie 9.4, page 56).

Les parcelles ont été choisies pour chaque activité de recherche dans l'objectif d'être représentatives de la zone d'étude. Toutes les parcelles sont situées dans un seul bloc agroécologique : BAE Karoke Mahandrorano, dans les fokontany Ankelirandro et Marofoty centre (commune rurale Tsimananada). Mais les parcelles témoins, n'ayant jamais été cultivées avec du cajanus, ont dû être sélectionnées dans le fokontany d'Amboroa, en limite du bloc.

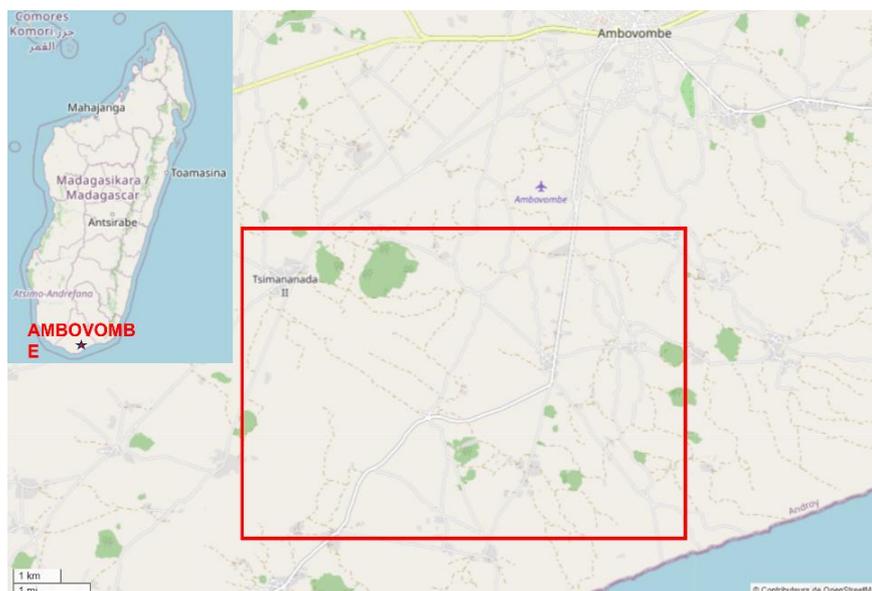


Figure 1 : Zone de travail, BAE Karoke Mahandrorano et parcelles témoins



Photo 2 : Types parcelles visitées, a : parcelles dégradées ; b : mini-forêt ; c : cajanus en bande

Parcelles dégradées : parcelles de jachère traditionnelle, non cultivées depuis 2 ou 3 ans

Mini-forêt : parcelles de jachères améliorées avec plantation en plein de cajanus (espacement de 1m x 1m entre les arbres)

Cajanus en bande : parcelles de haies de cajanus utilisés comme brise-vent avec des cultures associées comme les céréales, autres légumineuses (niébé, pois de lima, etc.), plantes à tubercules et/ou cucurbitacées (espacements de 8 m à 10 m entre les bandes)

4.4 Techniques cultures recommandées par le CTAS

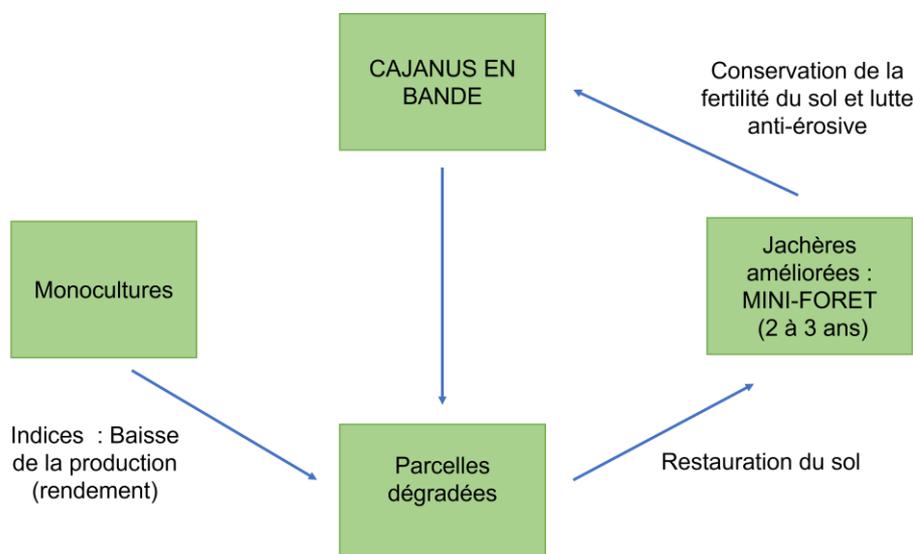


Figure 2 : Techniques recommandées par le CTAS

Le système de monoculture a été pratiqué pendant de nombreuses années. La diminution des rendements alerte les producteurs sur la baisse de fertilité de leurs parcelles. À ce stade, les parcelles sont mises en jachère traditionnelle, laissées sans culture pendant 3 à 5 ans pour se régénérer. Lorsque les adventices comme *Cynodon dactylon* repoussent et recouvrent toute la parcelle, cela indique une restauration potentielle de la fertilité du sol.

Le CTAS et le GRET ont remplacé les techniques de jachère traditionnelle par la culture pure de *Cajanus cajan* en mini-forêt, ou « *sariala* », pendant 2 à 3 ans (Figure 2). Après cette période soit certaines lignes de cajanus sont retirées pour introduire des cultures dans la parcelle, soit de nouvelles lignes sont plantées en bordure pour former des haies puis la mini-forêt est exploitée. Ces haies, appelées "parcelles de cajanus en bandes", sont cultivées en association avec d'autres cultures comme les céréales, tubercules, légumineuses (niébé, pois de lima, etc.) et cucurbitacées (Figure 2).

Lorsque le producteur observe une nouvelle baisse de fertilité sur les parcelles en bande, il lui est conseillé de replanter des mini-forêts de cajanus (Figure 2).

4.5 Historiques culturelles des parcelles étudiées

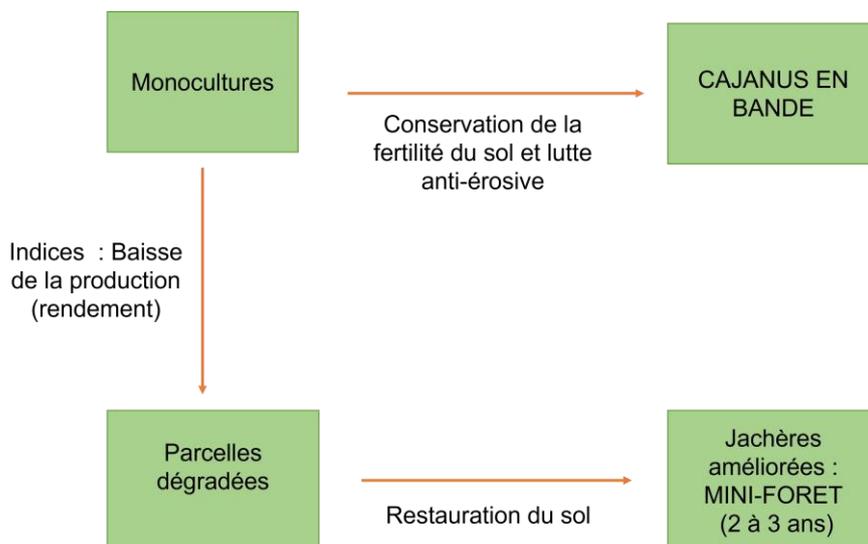


Figure 3 : Techniques observées dans les parcelles (enquêtes effectuées auprès de 16 ménages)

Les antécédents cultureux des parcelles étudiées révèlent que (Figure 3) :

- Les parcelles de cajanus en bandes étaient soit déjà en cajanus en bandes, soit des parcelles de cultures sans cajanus deux ans auparavant.
- Les parcelles de mini-forêts étaient des parcelles de cultures sans cajanus où le producteur avait constaté une nette baisse de fertilité. Il n'y a pas eu de parcelles de cajanus en bandes qui ont été transformées en mini-forêts ou l'inverse.
- Les parcelles témoins prises en compte dans cette étude étaient en jachère traditionnelle depuis trois ans.

5. Partie 1 : Etude sur l'impact des techniques agroécologiques à base de cajanus sur la qualité biologique du sol

L'objectif principal est d'évaluer l'abondance et la diversité de la macrofaune dans les systèmes agroécologiques avec cajanus en raison des services écosystémiques qu'elle fournit, notamment la décomposition de la matière organique du sol, l'amélioration de la disponibilité des nutriments et de la structure des sols.

5.1 Parcelles sélectionnées

Dans cette étude de la qualité biologique du sol, 24 parcelles ont été sélectionnées :

- 4 parcelles de mini-forêt de 1 an
- 4 parcelles de mini-forêt de 2 ans
- 4 parcelles de cajanus en bande de 1 an
- 4 parcelles de cajanus en bande de 2 ans
- 4 parcelles dégradées/abandonnées : parcelles témoins
- 4 parcelles de monoculture de manioc (2) et de maïs (2)

Tableau 1 : Liste des traitements pour étude sur les paramètres biologiques

<i>Parcelle</i>	<i>Traitement</i>
Mini-forêt 1 an	MF_Y1
Mini-forêt 2 ans	MF_Y2
Cajanus en bande 1 an, distance proche	CB_Y1_pro
Cajanus en bande 1 an distance éloigné	CB_Y1_elg
Cajanus en bande 2 ans distance proche	CB_Y2_pro
Cajanus en bande 2 ans distance éloigné	CB_Y2_elg
Monoculture de manioc ou maïs	Mono
Témoin dégradé/abandonné	Témoin

5.2 Méthodologie

Deux méthodes ont été utilisées pour déterminer l'impact des techniques agroécologiques sur la qualité biologique du sol :

Méthode TSBF : une approche couramment utilisée pour inventorier la macrofaune du sol, notamment dans les zones tropicales. Elle permet d'étudier la biodiversité et l'abondance des organismes présents dans le sol, tels que les vers de terre, les insectes et autres invertébrés.

La méthode consiste à prélever des blocs de sol de dimensions standard (généralement 25 x 25 cm et 30 cm de profondeur). Chaque bloc est ensuite sectionné en plusieurs couches pour évaluer la distribution verticale de la faune. Chaque couche de sol est examinée manuellement. Les organismes visibles à l'œil nu (généralement de plus de 2 mm) sont retirés et conservés dans un récipient avec alcool à 70°. Les organismes collectés sont ensuite identifiés jusqu'au niveau le plus précis possible (généralement l'espèce ou le groupe fonctionnel). Les informations sur le nombre d'individus et la biomasse de chaque taxon ou groupe fonctionnel sont enregistrées. Ces données permettent d'évaluer la diversité de la macrofaune, sa distribution et son rôle dans le fonctionnement de l'écosystème.

Deux monolithes ont été collectés aléatoirement dans les parcelles de mini-forêts, les monocultures, et les parcelles témoins,

Dans les parcelles avec cajanus en bande, deux monolithes ont été prélevés à deux localisations distinctes : une proche de la bande de cajanus et une autre au milieu entre deux bandes.

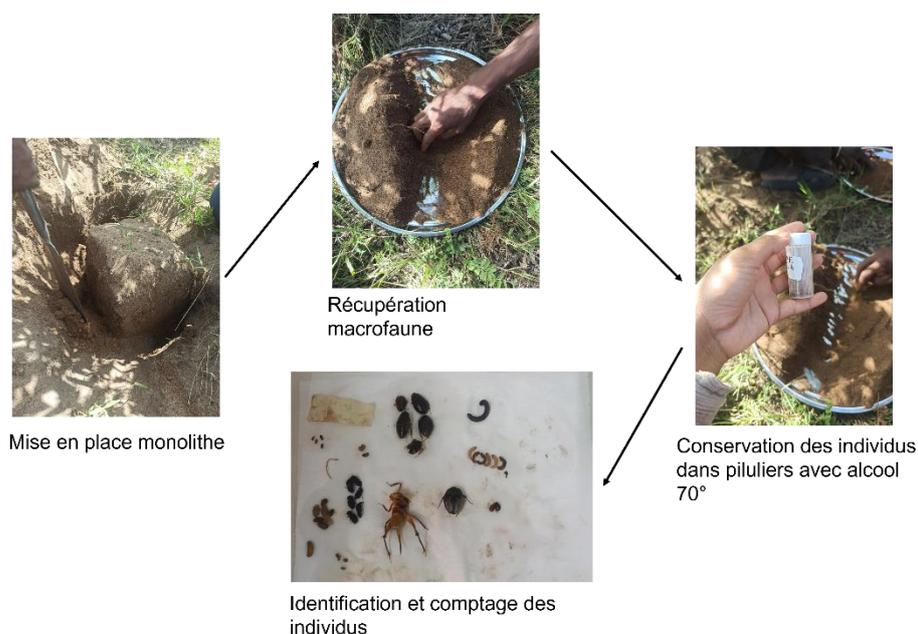


Figure 4 : Application de la méthode TSBF (Tropical Soil Biology and Fertility)

Test Bait lamina : c'est une technique utilisée pour étudier l'activité biologique du sol, en particulier l'activité des organismes responsables de la décomposition de la matière organique (macrofaune, mésofaune, et microorganismes). Elle permet de mesurer la dégradation de matières organiques en fonction de l'activité des organismes du sol pour une localisation donnée. Pour ce faire, on utilise des baits laminas, languettes en PVC percées de 16 trous de 1,5 mm de diamètre, qui ont été insérés verticalement dans le sol. Ces trous sont remplis d'un substrat organique, progressivement consommé par les organismes du sol au cours du temps. L'activité de décomposition est ensuite estimée visuellement, la disparition du substrat étant proportionnelle à l'intensité de l'activité alimentaire des organismes.

Ainsi, les languettes de baits laminas ont été disposées dans chaque parcelle. Dans les parcelles de mini-forêts, parcelles témoins ainsi que les parcelles dégradées/abandonnées, 10 baits laminas (2 substrats différents : cf. figure 5.a) ont été placés. Dans les parcelles de cajanus en bande, 10 laminas ont été placés proche de la bande de cajanus et 10 autres au milieu de deux bandes. Les baits laminas ont été laissés sur place pendant 3 semaines avant d'être retirés.

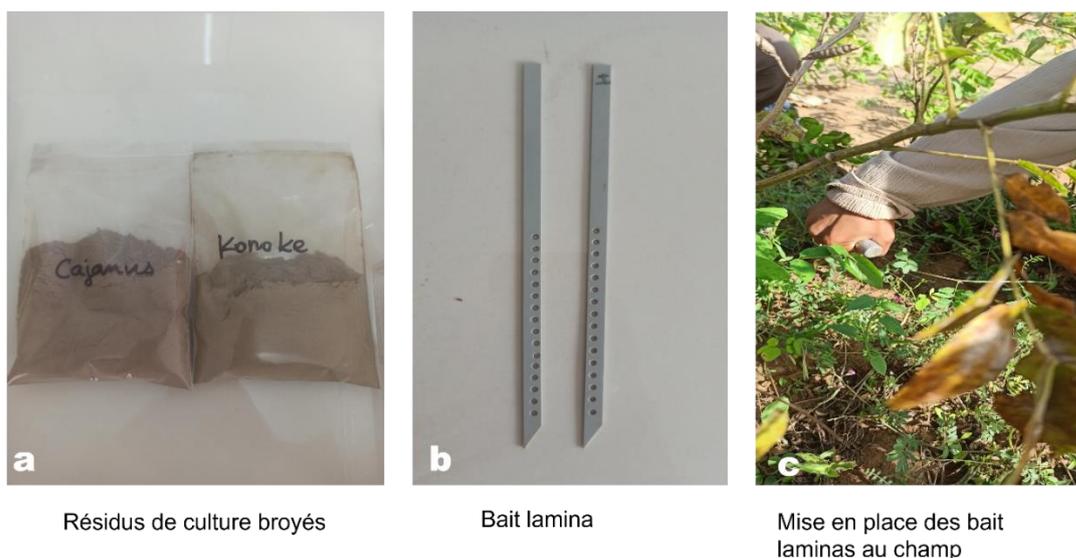


Figure 5 : Test bait lamina, *a* : types de substrats ; *b* : languettes de bait lamina ; *c* : mode de mise place dans le sol

5.3 Résultats

5.3.1 Abondance de la macrofaune

L'abondance des groupes des invertébrés est exprimée en densité, soit en nombre d'individus par mètre carré (ind.m⁻²). Un effet significatif du système sur l'abondance de la macrofaune est observé (p-value = 1.78e⁻⁵) ainsi qu'en fonction de la profondeur du sol (p-value = 9.381e⁻⁷). Le tableau 2 présente la moyenne du nombre de macrofaunes répertoriées dans chaque parcelle au cours de l'inventaire. Les parcelles mini-forêt de 1 an présentent un nombre d'individus total significativement élevé (1172 individus) par rapport aux autres systèmes (cajanus en bande, monocultures et témoin) à l'exception des parcelles de mini-forêt de 2 ans (652 individus) (Tableau 2). D'ailleurs, le nombre d'individus total dans les parcelles de mini-forêts de 2 ans sont significativement supérieur à celui dans les parcelles de cajanus en bande de 1 an à distance éloignée (92 individus).

Tableau 2 : Nombre d'individus total répertoriés dans chaque parcelle étudiée (n = 4 répétitions par système)

		PARCELLE							
		MF-Y1	MF-Y2	CB-Y1-elg	CB-Y1-pro	CB-Y2-elg	CB-Y2-pro	Témoin	Mono
Profondeur	0 - 10 cm	1004 a	432 a	28 a	108 a	84 a	216 a	160 a	128 a
	10 - 20 cm	120 b	152 b	52 b	36 b	44 b	44 b	80 b	68 b
	20 - 30 cm	48 c	68 c	12 c	76 c	52 c	24 c	16 c	28 c
	0 - 30 cm	1172 A	652 AB	92 C	220 BC	180 BC	284 BC	256 BC	224 BC

Différentes lettres minuscules indiquent des différences significatives entre profondeurs pour un même systèmes et différentes lettres majuscules indiquent des différences significatives entre systèmes toutes profondeurs confondues (p-value < 0.05).

MF-Y1 : parcelle mini-forêt de 1 an ; **MF-Y2** : parcelle mini-forêt de 2 ans ; **CB-Y1-elg** : parcelle en bande d'un an avec le point d'échantillonnage au milieu de deux bandes ; **CB-Y1-pro** : parcelle en bande d'un an avec le point d'échantillonnage proche de la bande ; **CB-Y2-elg** : parcelle en bande de 2 ans avec le point d'échantillonnage au milieu de deux bandes ; **CB-Y2-pro** : parcelle en bande de 2 ans avec le point d'échantillonnage proche de la bande ; **Témoin** : parcelle témoin dégradée/abandonnée ; **Mono** : parcelle en monoculture de manioc ou de maïs

Suivant la profondeur, la densité totale de la macrofaune est la plus élevée sur 0-10 cm, avec une moyenne de 35,4 ind.m⁻². Cette densité diminue ensuite, avec une moyenne de 31,5 ind.m⁻² pour la profondeur 10-20 cm et 23,7 ind.m⁻² pour la profondeur 20-30 cm.

5.3.2 Diversité de la macrofaune

Douze groupes de macrofaune ont été identifiés : Coléoptères, Mollusques, Oligochètes, Isoptères, Arachnides, Orthoptères, Hyménoptères, Diptères, Hétéroptères, Chilopodes, Crustacés, Dermaptères et Myriapodes. La présence et le nombre d'individus inventorié de chaque groupe varient selon le type de parcelle (Figure 6), à l'exception des Coléoptères qui sont toujours présents mais en quantités différentes. Le nombre d'espèces est le plus élevé dans les mini forêts de 1 an (22 espèces en moyenne) et les mini-forêt de 2 ans (23 espèces en moyenne) suivi par les parcelles en bande avec la position proche des cajanus (16 espèces en moyenne pour CB_Y1_pro et 19 espèces en moyenne pour CB_Y2_pro).

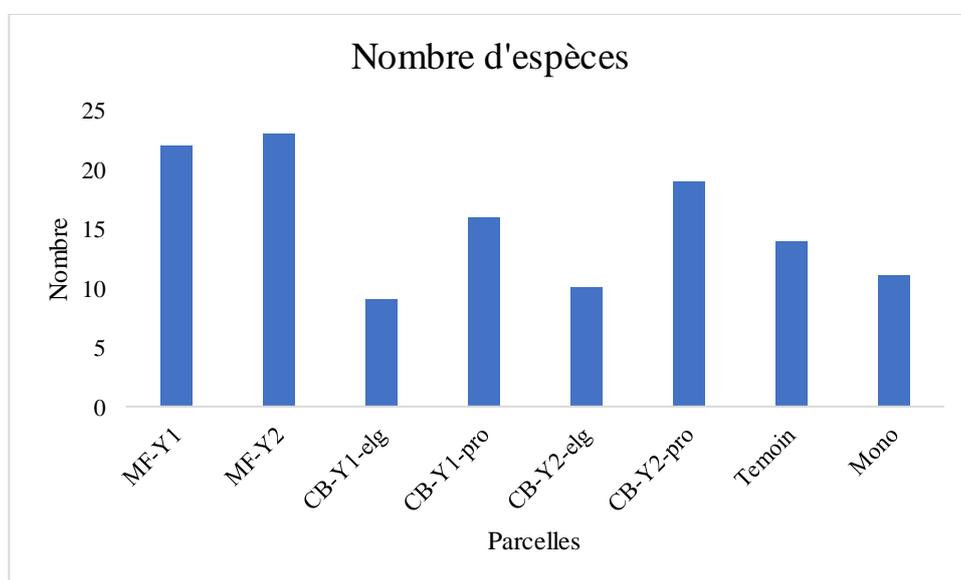


Figure 6 : Nombre d'espèces par parcelle

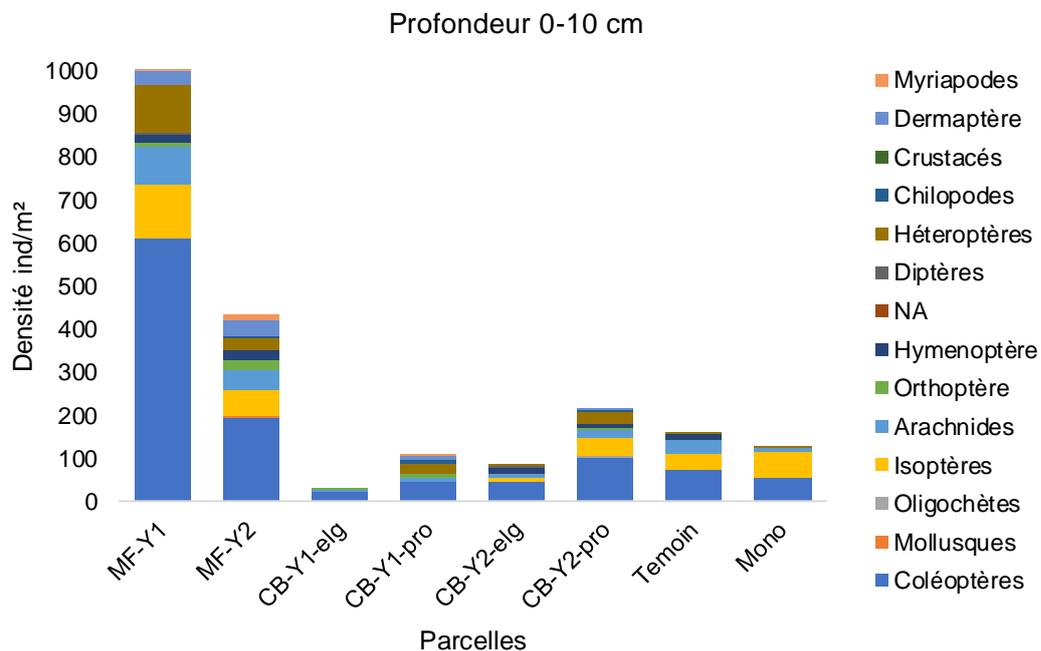


Figure 7 : Densité de la macrofaune suivant l'espèce dans la profondeur 0-10 cm

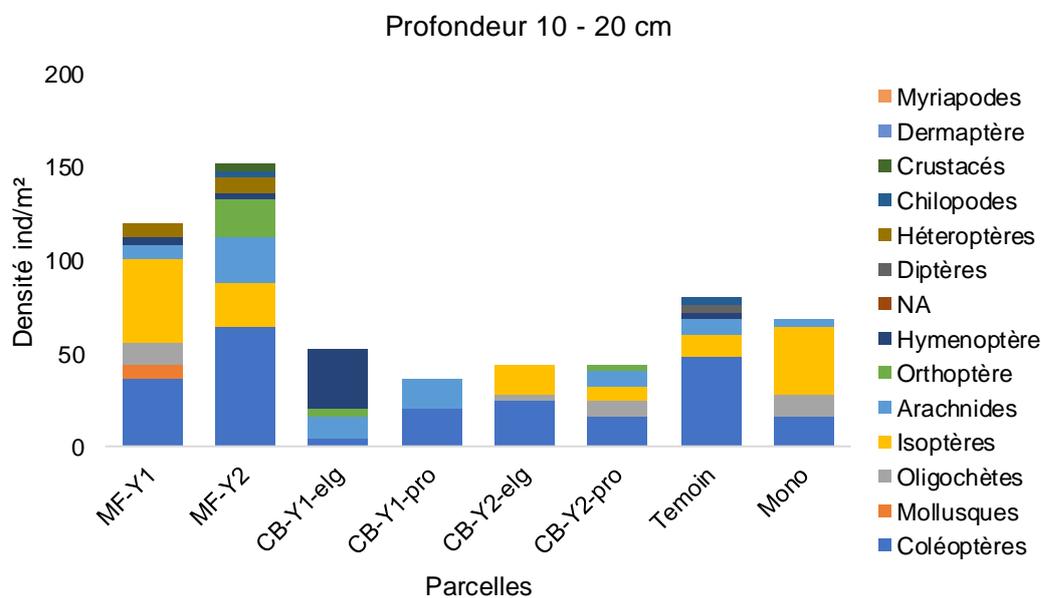


Figure 8 : Densité de la macrofaune suivant l'espèce dans la profondeur 10-20 cm

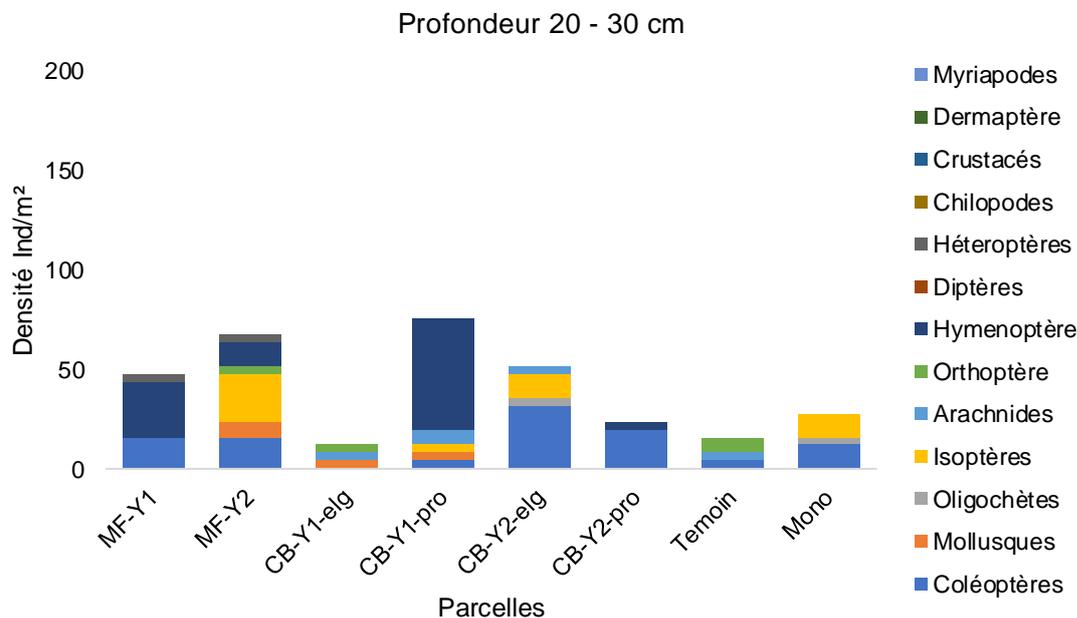


Figure 9 : Densité de la macrofaune suivant l'espèce dans la profondeur 20-30 cm

La densité suivant les espèces de la macrofaune est la plus élevée dans la couche superficielle du sol (0-10cm) (Figure 7). Les mini-forêts âgées de 1 an enregistrent la densité la plus importante, atteignant près de 1000 ind.m⁻² contre 400 ind.m⁻² à la même profondeur pour les mini-forêts de 2 ans. Et, pour ce système (mini-forêts de 1 an et 2 ans), cette densité suivant les espèces diminue considérablement avec la profondeur : inférieure à 200 ind.m⁻² pour la profondeur 10-20 cm et inférieure à 100 ind.m⁻² pour la profondeur 20-30 cm (Figure 8 et Figure 9). Sur 0-10 cm et 10-20 cm de profondeur, le groupe le plus représenté est celui des Coléoptères, suivi par les Isoptères (Figure 8). Sur 20-30 cm, c'est celui des hyménoptères (fourmis) qui est très présent (Figure 9).

La structure d'abondance relative des espèces détermine l'équitabilité ou la dominance d'une espèce dans une communauté donnée. Un écosystème harmonieux correspond à une communauté équilibrée et donc une richesse spécifique équitale.

L'indice de Shannon (H') et l'Indice d'équitabilité (H) sont des outils statistiques utilisés dans cette étude pour montrer quel système de culture (mini-forêt, cajanus en bande, jachères traditionnelles, monoculture) conduit à un écosystème équilibré.

Principes : 1) plus la valeur de l'indice H' est élevée, plus la diversité est grande et 2) une communauté équitable se traduit par une valeur de H proche ou égale à 1 ; à l'inverse plus sa valeur est faible, proche de 0, moins l'écosystème est équitable.

L'indice de Shannon H' tient à la fois compte du nombre d'espèces et de l'abondance relative de chaque espèce dans les parcelles. Dans notre étude (figure 10), les parcelles de mini-forêts de 1 an et 2 ans (MF_Y1 et MF_Y2) ont les valeurs H' les plus élevées, suivi des parcelles de cajanus en bande de 2 ans, à distance proche (CB_Y2_pro).

Par contre, l'indice d'équitabilité H nous permet d'identifier si les espèces sont réparties équitablement dans le sol ou si certaines espèces sont dominantes. Dans notre étude, les parcelles monocultures (Mono) donnent la valeur la plus faible de H.

Ces résultats suggèrent que les mini-forêts sont non seulement riches en espèces, mais aussi que les espèces sont réparties de manière plus équilibrée, ce qui pourrait indiquer un environnement plus stable et sain.

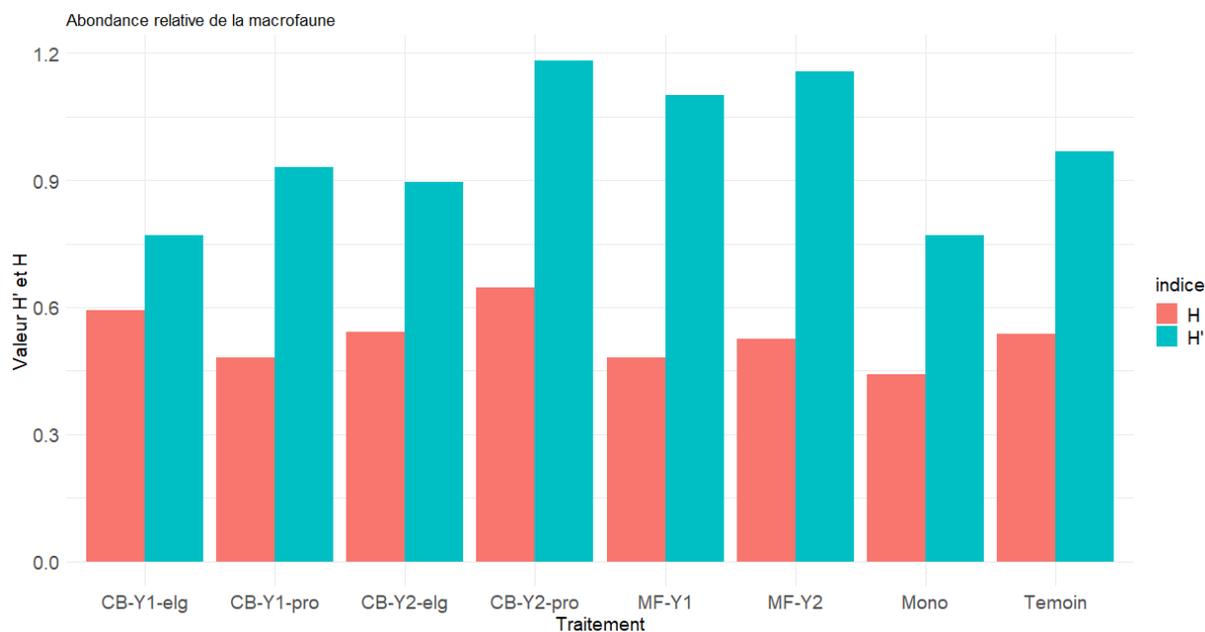


Figure 10 : Abondance relative de la macrofaune

5.3.3 Groupe fonctionnel de la macrofaune

Les différents groupes de macrofaune répertoriés dans chaque type de parcelle peuvent être classés suivant leurs groupes fonctionnels :

- **Saprophages - coprophages** : ce sont les principaux décomposeurs de la matière organique du sol (ex : fourmis *Monomorium* et hexodon)
- **Géophage** : agit dans la décomposition des matières organiques du sol et la restructuration physique du sol (ex : vers de terre)
- **Phytophages** : ce sont des ravageurs potentiels de cultures (ex : *Gonocephalum*)
- **Prédateurs** : ce sont les régulateurs de la population de la faune du sol (ex : araignées)

En analysant les groupes fonctionnels, on constate que le groupe géophage (1% du total) apparaît uniquement dans la parcelle de mini-forêt de 2 ans (MF-Y2). Ils sont représentés par des vers de terre (lombric). Dans ce système, les saprophages représentent 50% des individus, les prédateurs 20%, les phytophages 17% et les coprophages 12% (Figure 11-b). Pour le cajanus en bande de 1 an, la composition est dominée par les saprophages (Figure 11-c-d), une tendance également observée dans les parcelles témoins (Figure 11-g) et les parcelles de monocultures (Figure 11-h).

Le cajanus apporte de la matière organique (MO) au sol. Cette MO est un déterminant majeur de l'activité biologique du sol et est fortement corrélée à la biodiversité du sol (Carter, 2002). Ceci est cohérent avec nos résultats avec de plus fortes densités de décomposeurs dans les mini forêts et à proximité des cajanus en bandes. *Pontoscolex corethrurus*, répertoriée dans le MF-Y2, est une espèce endogée qui se nourrit principalement de sol plus ou moins riche en matière organique. L'apparition de cette espèce pourrait être ainsi un indicateur d'amélioration ou restauration de la fertilité des sols de ce milieu. On constate cependant une diminution de la proportion des saprophages dans les parcelles de mini-forêts et cajanus en bande à partir de 2 ans. Cette observation pourrait s'expliquer par un mécanisme de régulation de l'écosystème induit par le cajanus favorisant un équilibre entre groupes de macrofaune.

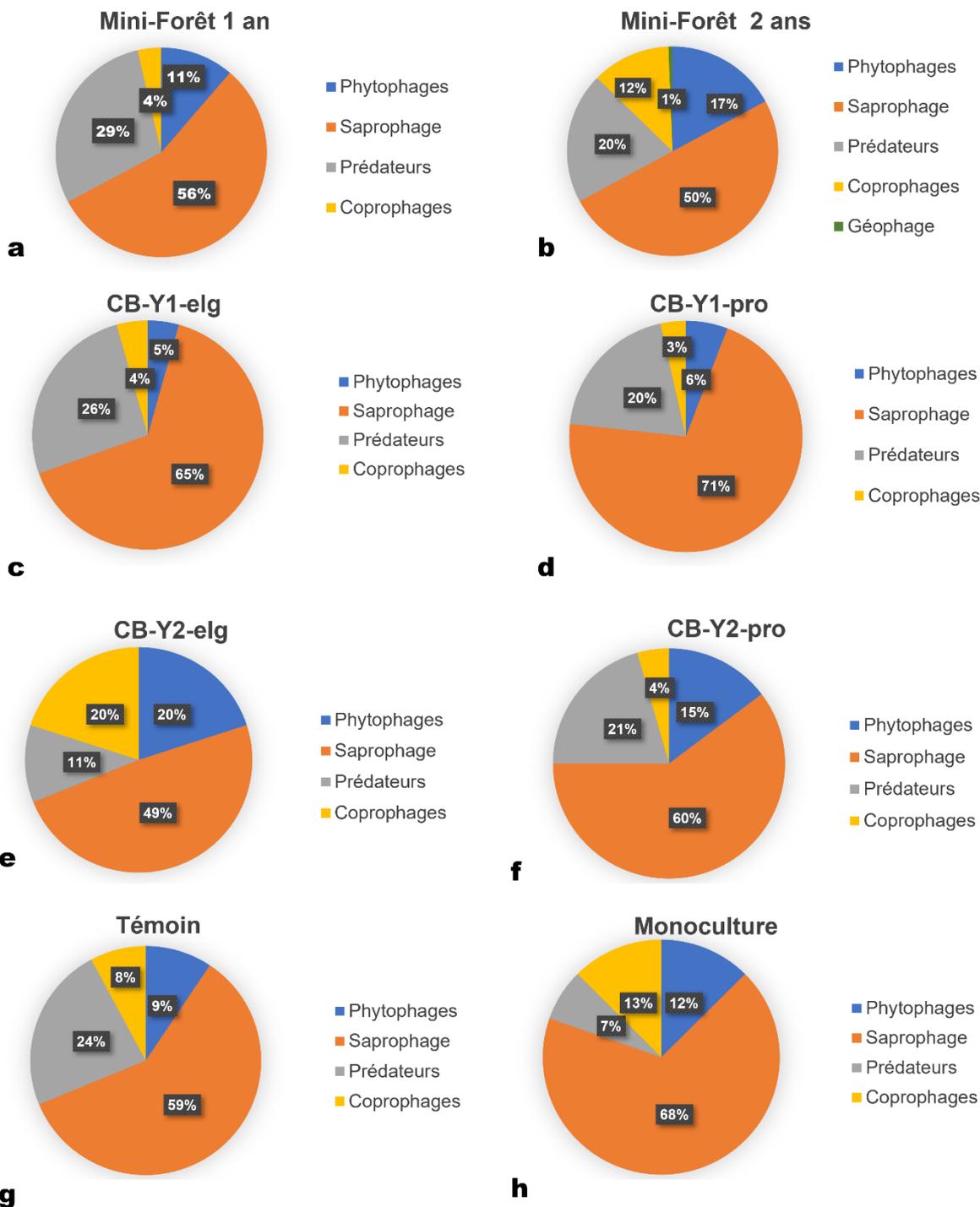


Figure 11 : Groupe fonctionnel par parcelles

5.4 Activité biologique

Deux types de substrats ont été testés : substrat_1 composé de résidus de cajanus et substrat_2 composé de résidus de pois de lima et maïs. La consommation des substrats comptés sur les baits laminas correspond une meilleure activité biologique dans la parcelle.

En moyenne, la meilleure activité est observée dans les parcelles de mini-forêts de 2 ans (MF_Y2) et la plus faible dans les mini-forêts de 1 an (MF_Y1) (Figure 14). Cela pourrait être expliqué par le fait que, comme il y a plus de matières organiques disponibles dans le sol des parcelles MF_Y1 (cf. infra : résultats physico-chimiques), les baits laminas sont de ce fait moins appétant pour la macrofaune du sol. En effet, les observations sur le terrain ont montré qu'il y a plus de matière sèche dans toute la parcelle de MF_Y1. A l'inverse, on n'en retrouve que sous les pieds de cajanus uniquement dans les parcelles de MF_Y2.

Un test t a permis de montrer que tous systèmes confondus, il n'y a pas de préférence ou différence statistique entre les deux types de substrats utilisés (p -value =0.073). Cependant les substrats à base de résidus de pois de lima et de maïs (résidus 2, *konoke*) ont été plus consommés dans les mini forêts de 1 et 2 ans (MF_Y1 ; MF_Y2) ainsi que dans les cajanus en bande de 1 an au milieu de la parcelle (CB_Y1_elg). Ceci pourrait être expliqué la plus facile décomposition dû à pois de lima par rapport au cajanus par la macrofaune. Les macrofaunes du sol ne montrent pas une préférence sur le substrat 1 (résidus de cajanus) car ces résidus sont déjà disponibles en abondance dans les parcelles en mini-forêt et en cajanus en bande. En revanche, au moment où la matière organique devient rare et les parcelles pauvres en ressource alimentaire pour le cas des parcelle témoins et monocultures (Témoin, Mono), l'activité alimentaire entre les deux substrats est assez similaire. La faune du sol se comporte comme des opportunistes qui consomme la ressource disponible dans leur milieu.

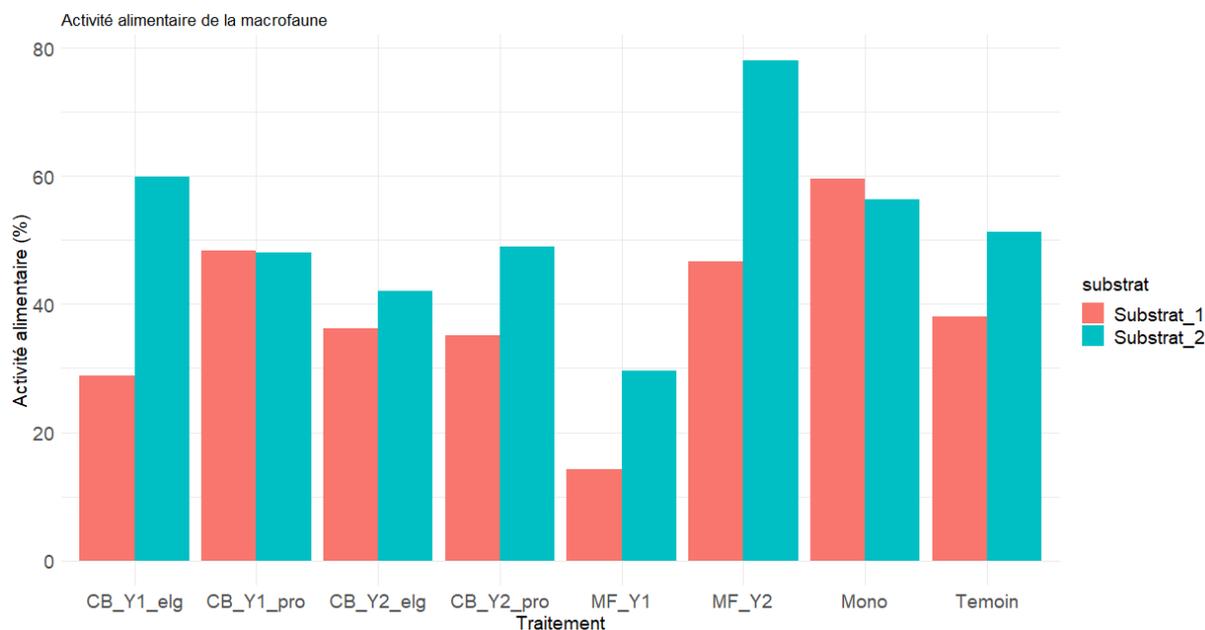


Figure 12 : Activité alimentaire de la macrofaune en fonction des substrats à base de cajanus (substrat 1) ou de pois de lima et maïs (substrat 2)

5.5 Conclusion

Les résultats montrent que les mini-forêts, en particulier celles de 1 an, favorisent une densité et une diversité élevée de la macrofaune du sol. Cela montre que les conditions dans une mini-forêt sont favorables, notamment la plus grande disponibilité de ressources carbonées (*cf. infra*), pour la colonisation rapide de la macrofaune. Dans les mini-forêts de 2 ans, il a été observé que l'activité biologique était intense, ce qui en fait des milieux favorables pour la décomposition de la MO et le recyclage des nutriments.

Malgré la forte diminution de l'abondance de la macrofaune entre les mini-forêts de 1 an et 2 ans, les valeurs observées sont toujours deux fois supérieures aux parcelles en jachères traditionnelles et monocultures. De plus, la diversité spécifique de la macrofaune augmente en deuxième année par rapport à la première année, signe d'une tendance vers un état d'équilibre de l'écosystème (e.g apparition du groupe géophage (vers de terre)). L'effet des cajanus en bande est également confirmé puisque la diversité de la macrofaune est plus forte dans la position à proximité des cajanus par rapport à celle observée dans l'interbande de cajanus.

Les résultats des inventaires ont ainsi mis en évidence l'importance de la plantation de *Cajanus cajan* pour la diversification de la macrofaune du sol. Cette observation suggère que la culture du cajanus pourrait être une solution efficace pour entretenir et maintenir le bon fonctionnement du sol via les processus de décomposition de la matière organique.

Cette étude montre que la mise en place de mini-forêts dans d'autres régions de Madagascar aux conditions pédoclimatiques avoisinantes, pourrait être une technique agroécologique adaptée pour l'amélioration de la diversité biologique des sols.

6. Partie 2 : Etude sur l'impact des techniques agroécologiques à base de cajanus sur les propriétés physico-chimiques du sol

L'objectif principal est de caractériser l'impact des techniques agroécologiques utilisant cajanus sur les propriétés physico-chimiques du sol : stabilité structurale du sol, pH_{eau} , teneurs en éléments nutritifs, C, N, P, K, et bases échangeables Ca, Na.

6.1 Parcelles sélectionnées

Dans cette étude de la propriété physico-chimique du sol, 24 parcelles ont été sélectionnées :

- 4 parcelles de mini-forêt de 1 an
- 4 parcelles de mini-forêt de 2 ans
- 4 parcelles de cajanus en bande de 1 an
- 4 parcelles de cajanus en bande de 2 ans
- 4 parcelles témoins dégradées/abandonnées
- 4 parcelles monocultures manioc (2) et maïs (2)

Tableau 3 : Liste des traitements pour étude sur les paramètres physico-chimiques

<i>Parcelle</i>	<i>Traitement</i>
Mini-forêt 1 an	MF_Y1
Mini-forêt 2 ans	MF_Y2
Cajanus en bande 1 an, distance proche	CB_Y1_pro
Cajanus en bande 1 an, distance moyenne	CB_Y1_moy
Cajanus en bande 1 an distance éloigné	CB_Y1_elg
Cajanus en bande 2 ans distance proche	CB_Y2_pro
Cajanus en bande 2 ans distance moyenne	CB_Y2_moy
Cajanus en bande 2 ans distance éloigné	CB_Y2_elg
Monoculture manioc ou maïs	Mono
Témoin dégradé/abandonné	Témoin

6.2 Méthodologie de prélèvement

Dans chacune des parcelles, des prélèvements de sol distincts ont été réalisés :

- Échantillons destinés à l'analyse des teneurs en nutriments
- Échantillons pour la mesure de la densité apparente

Dans les parcelles de mini-forêts, parcelles monocultures et les parcelles témoins, trois points de collecte ont été considérés puis mélangés pour avoir un échantillon composite (Figure 13).

Dans les parcelles de cajanus en bande, trois points de collecte ont été considérés suivant la distance à la bande. Le premier point a été collecté sur la première ligne de culture proche de la bande. Le second point a été collecté au milieu des 2 bandes. Le troisième point est situé entre les 2 points précédents (Figure 14). Les échantillons prélevés sur ces trois points n'ont pas été mélangés.

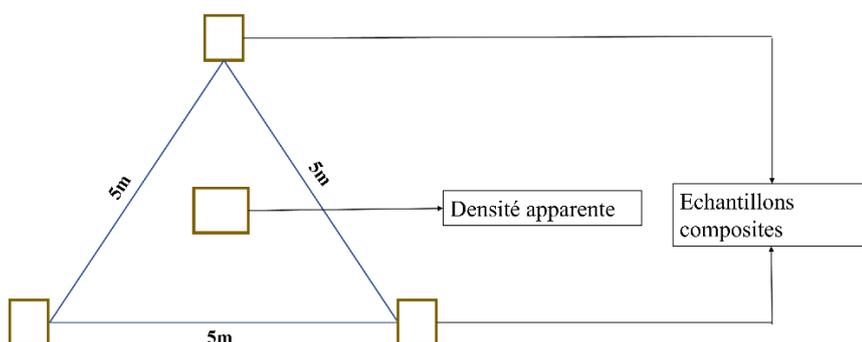


Figure 13 : Mode de prélèvement des sols dans les parcelles de mini-forêt, parcelles monocultures et parcelles témoins

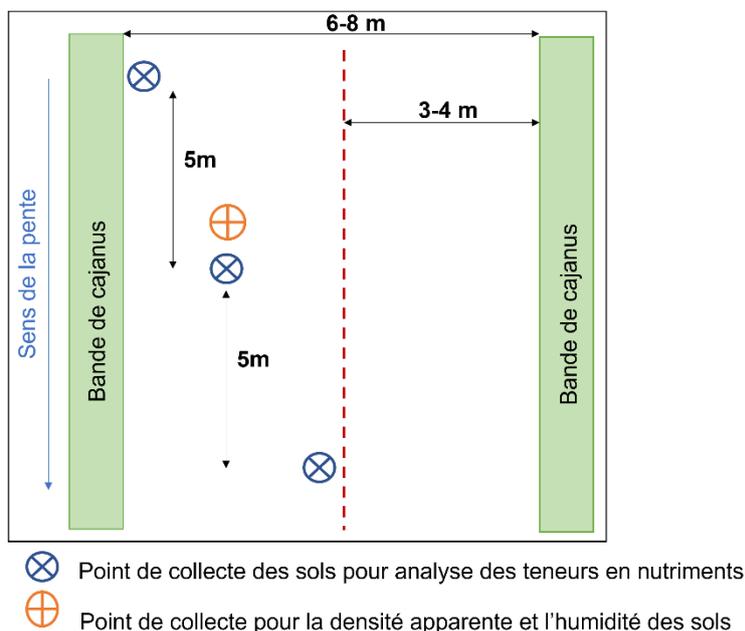


Figure 14 : Mode de prélèvement dans les parcelles de cajanus en bande

6.3 Résultats et Analyses

Les échantillons de sol ont été préparés et analysés dans le laboratoire LRI-Agro. Le pH eau du sol, les teneurs en C, N total, P assimilable et K ainsi que les bases échangeables Ca et Na ont été mesurées.

Afin de tester l'effet des traitements et de la profondeur du sol sur les différents éléments, un test de normalité puis un test Tuckey ou Kruskal-wallis ont été réalisés au seuil de $\alpha = 0,05$.

6.3.1 Densité apparente du sol

Tableau 4: Moyenne de la densité apparente du sol par système (n=4)

Traitement	Profondeur			
	0-10 cm	10-20 cm	20-30 cm	0-30 cm
CB-Y1	1,63 a	1,60 ab	1,54 b	1,59 AB
CB-Y2	1,62 a	1,60 ab	1,53 b	1,58 AB
MF_Y1	1,59 a	1,55 ab	1,52 b	1,55 B
MF_Y2	1,66 a	1,63 ab	1,60 b	1,63 A
Témoin	1,66 a	1,63 ab	1,61 b	1,63 A
Mono	1,53 a	1,54 ab	1,54 b	1,54 B

Différentes lettres minuscules indiquent des différences significatives entre profondeurs pour un même système et différentes lettres majuscules indiquent des différences significatives entre systèmes toutes profondeurs confondues (p -value < 0.05).

Les résultats montrent que la densité apparente du sol varie en moyenne entre 1,52 à 1,66 pour toutes les parcelles avec des valeurs qui diminuent la profondeur du sol sauf pour la parcelle en monoculture. Ces valeurs sont caractéristiques des sols sableux montrant que le sol est assez compacté.

Toutefois, la moyenne de la densité apparente est significativement différente par traitement (p -value = 0.0005) et suivant la profondeur du sol (p -value = 0,01). Les parcelles de mini-forêts de 1 an et les parcelles en monocultures présentent une densité apparente significativement inférieures (1,55 et 1,54, respectivement) à celles des mini forêt de 2 ans et des parcelles témoins (1,63 pour les deux systèmes), ceci peut être expliqué par un travail du sol plus récent dans les premiers (Tableau 4).

6.3.2 Impact du système sur le pH du sol

Une analyse pH_{eau} du sol a été réalisée au laboratoire LRI-Agro. Le pH des sols dans les différentes parcelles varie entre 7,2 et 9,1 avec une valeur moyenne de 8,53. Cela indique que les sols dans cette étude sont légèrement à fortement basiques.

Tableau 5 : Valeur moyenne du pH

pH	Profondeur			
	0-10 cm	10-20 cm	20-30 cm	0-30 cm
Traitement				
CB_Y1_elg	8,26	8,79	8,43	8,44
CB_Y1_moy	8,77	8,78	8,62	8,72
CB_Y1_pro	8,84	8,80	8,57	8,72
CB_Y2_elg	8,74	8,72	8,78	8,74
CB_Y2_moy	8,72	8,62	8,79	8,70
CB_Y2_pro	8,87	8,49	8,57	8,62
MF_Y1	8,80	8,67	8,69	8,71
MF_Y2	8,74	8,49	7,77	8,14
Témoin	8,92	8,62	8,70	8,73
Mono	8,87	8,58	8,02	8,35

MF-Y1 : parcelle mini-forêt de 1 an ; **MF-Y2** : parcelle mini-forêt de 2 ans ; **CB-Y1-elg** : parcelle en bande d'un an avec le point d'échantillonnage au milieu de deux bandes ; **CB-Y1-moy** : parcelle en bande d'un an avec le point d'échantillonnage moyennement proche de la bande ; **CB-Y1-pro** : parcelle en bande d'un an avec le point d'échantillonnage proche de la bande ; **CB-Y2-elg** : parcelle en bande de 2 ans avec le point d'échantillonnage au milieu de deux bandes ; **CB-Y2-moy** : parcelle en bande de 2 ans avec le point d'échantillonnage moyennement proche de la bande ; **CB-Y2-pro** : parcelle en bande de 2 ans avec le point d'échantillonnage proche de la bande ; **Témoin** : parcelle témoin dégradée/abandonnée ; **Mono** : parcelle en monoculture de manioc ou de maïs.

6.3.3 Impact du système sur le Carbone organique (CO)

Tableau 6 : Valeur moyenne de la teneur en carbone organique (exprimée g/kg de sol) (n=4 par système).

CO (g/kg)	Profondeur			
	0-10cm	10-20cm	20-30cm	0-30 cm
Traitement				
CB_Y1_elg	3,47±0,64 a	6,12±3,25 a	3,73±1,03 a	4,44±2,20 C
CB_Y1_moy	4,28±0,98 a	3,59±0,59 a	5,31±1,86 a	4,39±1,36 C
CB_Y1_pro	3,79±0,45 a	3,52±0,36 a	5,13±1,79 a	4,15±1,23 C
CB_Y2_elg	4,67±1,28 a	6,90±5,68 a	6,60±5,91 a	6,06±4,45 C
CB_Y2_moy	5,20±1,61 a	7,92±3,93 a	10,24±5,93 a	7,79±4,38 BC
CB_Y2_pro	5,90±2,11 a	7,03±1,21 a	7,48±1,82 a	6,80±1,73 BC
MF_Y1	11,02±7,82 a	14,43±8,23 a	15,87±0,02 a	13,77±8,18 AB
MF_Y2	6,04±3,76 a	6,01±3,39 a	9,61±6,91 a	7,22±4,81 BC
Témoin	3,55±0,36 a	4,68±1,39 a	3,63±0,55 a	3,96±0,97 C
Mono	6,47±3,80 a	7,48±5,66 a	7,90±4,69 a	7,28±4,37 BC

MF-Y1 : parcelle mini-forêt de 1 an ; **MF-Y2** : parcelle mini-forêt de 2 ans ; **CB-Y1-elg** : parcelle en bande d'un an avec le point d'échantillonnage au milieu de deux bandes ; **CB-Y1-moy** : parcelle en bande d'un an avec le point d'échantillonnage moyennement proche de la bande ; **CB-Y1-pro** : parcelle en bande d'un an avec le point d'échantillonnage proche de la bande ; **CB-Y2-elg** : parcelle en bande de 2 ans avec le point d'échantillonnage au milieu de deux bandes ; **CB-Y2-moy** : parcelle en bande de 2 ans avec le point d'échantillonnage moyennement proche de la bande ; **CB-Y2-pro** : parcelle en bande de 2 ans avec le point d'échantillonnage proche de la bande ; **Témoin** : parcelle témoin dégradée/abandonnée ; **Mono** : parcelle en monoculture de manioc ou de maïs. Les écarts-types ont été calculés par rapport aux 4 répétitions de chaque système.

Différentes lettres minuscules indiquent des différences significatives entre profondeurs pour un même système et différentes lettres majuscules indiquent des différences significatives entre systèmes toutes profondeurs confondues (p -value < 0.05).

Il y a un effet significatif du système sur les teneurs de carbone organique du sol (p -value = $6,67 \times 10^{-6}$). En effet, pour la couche de sol 0-30 cm, les parcelles mini-forêt de 1 an (MF_Y1) présentent des teneurs de CO significativement supérieures (13,77 g/kg de sol) à celles des parcelles témoins (3,95 g/kg de sol), des parcelles de cajanus en bandes à 1 an (4,44g/kg de sol, 4,39 g/kg de sol et 4,15 g/kg de sol respectivement pour les 3 distances échantillonnées : éloignée, moyenne et proche) ; ainsi que par rapport aux parcelles de cajanus en bande de 2 ans en position éloignée (6,06 g/kg de sol) (Figure 15). On observe une légère augmentation des teneurs en CO dans les parcelles de cajanus en bande de 2 ans par rapport à 1 an mais cette augmentation n'est pas significative (Tableau 6).

La réduction du CO dans les parcelles mini-forêts de 2 ans pourrait s'expliquer par la minéralisation rapide du CO, ce qui est en cohérence avec les valeurs du rapport C/N qui sont faibles (9,64 pour MF_Y1 et 10,35 pour MF_Y2) (*cf. infra*).

La teneur en CO est très variée suivant les profondeurs (Tableau 6). Cependant, les tests statistiques révèlent qu'il n'y a pas d'effet significatif de la profondeur sur les moyennes de CO (p -value = 0.25). Ce résultat pourrait être expliqué par le fait que les horizons superficiels sont régulièrement érodés avec le vent.

- Entre 0-10 cm, le CO varie entre 2,60 et 22,69 g/kg de sol avec une moyenne de 5,44 g/kg de sol pour tous les traitements.
- Entre 10-20 cm, le CO varie entre 2,83 et 26,41 g/kg de sol avec une moyenne de 6,76 g/kg de sol pour tous les traitements.
- Entre 20-30 cm, le CO varie entre 2,09 et 28,11 g/kg de sol avec une moyenne de 7,55 g/kg de sol.

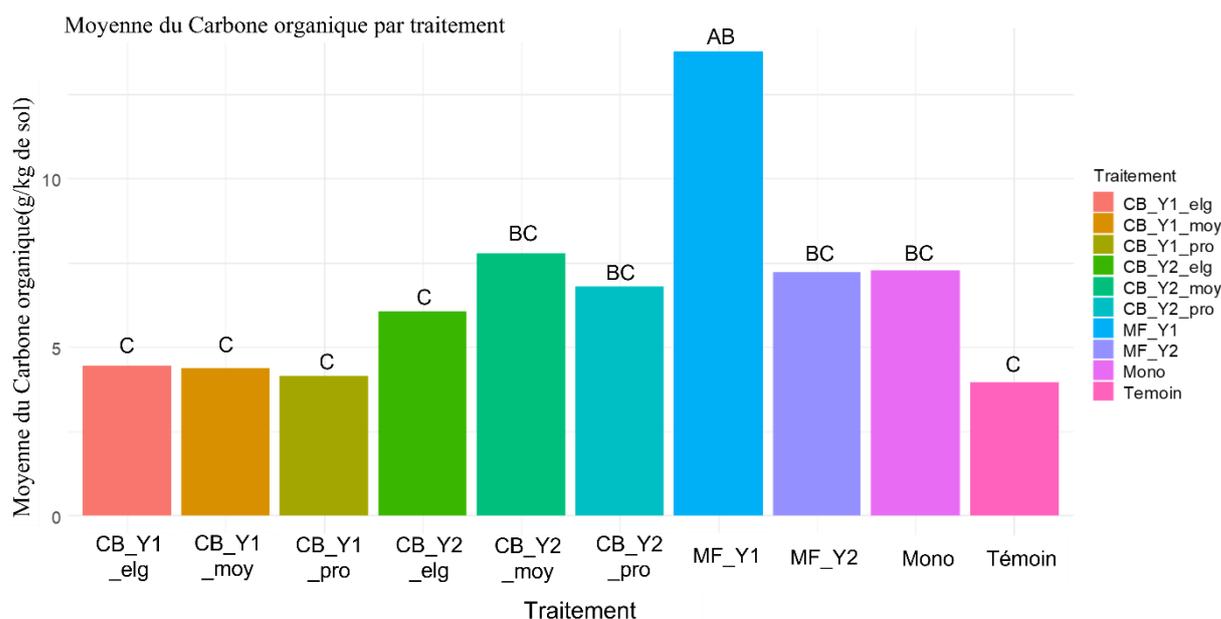


Figure 15 : Moyenne du carbone organique sur la profondeur 0-30 cm

Différentes lettres majuscules indiquent des différences significatives entre systèmes toutes profondeurs confondues (p -value < 0.05).

6.3.4 Impact du système sur l'azote total (N_{tot})

Tableau 7 : Valeur moyenne de la teneur en azote total (exprimée en g/kg de sol)

N total (g/kg)	Profondeur			
	0-10cm	10-20cm	20-30cm	0-30 cm
Traitement				
CB_Y1_elg	0,26±0,08 a	0,55±0,34 a	0,27±0,06 a	0,36±0,23 D
CB_Y1_moy	0,39±0,13 a	0,31±0,05 a	0,51±0,15 a	0,40±0,14 CD
CB_Y1_pro	0,32±0,08 a	0,31±0,05 a	0,47±0,17 a	0,37±0,13 CD
CB_Y2_elg	0,45±0,09 a	0,71±0,50 a	0,70±0,60 a	0,62±0,43 ABC
CB_Y2_moy	0,48±0,13 a	0,75±0,42 a	0,97±0,55 a	0,73±0,42 ABC
CB_Y2_pro	0,54±0,25 a	0,66±0,14 a	0,72±0,21 a	0,64±0,20 ABC
MF_Y1	1,04±0,63 a	1,46±0,71 a	1,71±1,02 a	1,40±0,78 AB
MF_Y2	0,58±0,42 a	0,61±0,42 a	0,97±0,64 a	0,72±0,49 ABC
Témoin	0,33±0,05 a	0,49±0,14 a	0,36±0,07 a	0,39±0,11 CD
Mono	0,65±0,36 a	0,82±0,53 a	0,90±0,36 a	0,79±0,40 ABC

MF-Y1 : parcelle mini-forêt de 1 an ; **MF-Y2** : parcelle mini-forêt de 2 ans ; **CB-Y1-elg** : parcelle en bande d'un an avec le point d'échantillonnage au milieu de deux bandes ; **CB-Y1-moy** : parcelle en bande d'1 an avec le point d'échantillonnage moyennement proche de la bande ; **CB-Y1-pro** : parcelle en bande d'un an avec le point d'échantillonnage proche de la bande ; **CB-Y2-elg** : parcelle en bande de 2 ans avec le point d'échantillonnage au milieu de deux bandes ; **CB-Y2-moy** : parcelle en bande de 2 ans avec le point d'échantillonnage moyennement proche de la bande ; **CB-Y2-pro** : parcelle en bande de 2 ans avec le point d'échantillonnage proche de la bande ; **Témoin** : parcelle témoin dégradée/abandonnée ; **Mono** : parcelle en monoculture de manioc ou de maïs. Les écarts-types ont été calculés par rapport aux 4 répétitions de chaque système.

Différentes lettres minuscules indiquent des différences significatives entre profondeurs pour un même système et différentes lettres majuscules indiquent des différences significatives entre systèmes toutes profondeurs confondues (p -value < 0.05).

Il y a un effet significatif du système sur les teneurs en azote total du sol (p -value = $2,16 \times 10^{-7}$). En effet, pour la couche 0-30 cm de profondeur, les parcelles mini-forêt 1 an (MF_Y1) présentent des valeurs de teneur en azote significativement supérieures (1,40 g/kg de sol) à celles des parcelles témoins (0,39 g/kg de sol), ainsi que des parcelles de cajanus en bandes à 1 an (0,36 g/kg de sol, 0,40 g/kg de sol et 0,37 g/kg de sol respectivement pour les 3 distances échantillonnées : éloignée, moyenne et proche (Tableau 7 ; Figure 16).

Cela pourrait être expliqué par l'importance des résidus, notamment des feuilles de cajanus, restés au sol et la forte fixation symbiotique de N_2 atmosphérique de cette espèce (*cf. infra*).

La teneur en N_{tot} ne varie pas statistiquement entre profondeurs du sol (p -value=0,06) :

- Entre 0 et 10 cm, la teneur en N_{tot} varie entre 0,16 et 1,98 g/kg de sol avec une moyenne de 0,50 g/kg de sol.
- De 10 à 20 cm, la teneur en N_{tot} varie entre 0,20 et 2,47 g/kg de sol avec une moyenne de 0,66 g/kg de sol.
- De 20 à 30 cm, la teneur en N_{tot} varie entre 0,22 et 3,03 g/kg de sol avec une moyenne de 0,75.

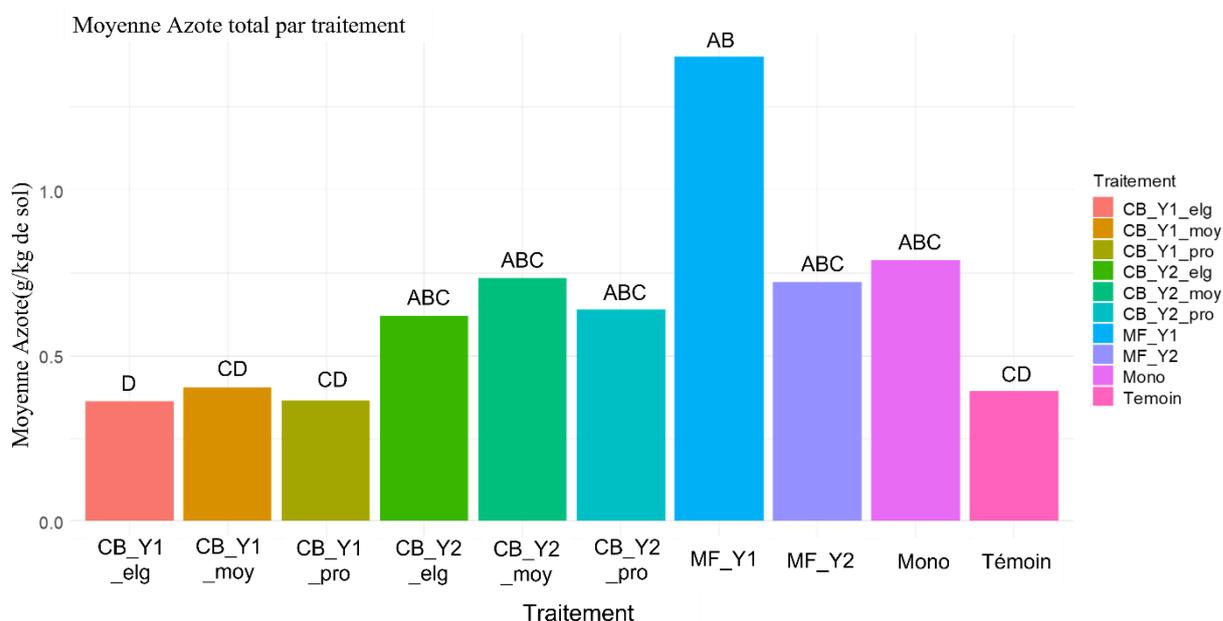


Figure 16 : Teneur en azote total sur la profondeur 0-30 cm

Différentes lettres majuscules indiquent des différences significatives entre système toutes profondeurs confondues (p -value < 0.05).

6.3.5 Impact du système sur le phosphore assimilable (P_{ass})

Tableau 8 : Valeur moyenne de la teneur en Phosphore assimilable (P_{ass}) (exprimée en mg/kg de sol)

Pass (mg/kg)	Profondeur			
	0-10 cm	10-20 cm	20-30 cm	0-30 cm
CB_Y1_elg	6,86±3,59 a	4,23±3,03 b	2,69±1,43 b	4,59±3,13 A
CB_Y1_moy	8,71±5,96 a	3,95±1,45 b	2,71±0,82 b	5,12±4,21 A
CB_Y1_pro	7,31±4,27 a	3,59±1,94 b	2,30±1,30 b	4,40±3,37 A
CB_Y2_elg	7,47±5,08 a	6,23±5,87 b	3,13±1,72 b	5,61±4,57 A
CB_Y2_moy	7,92±5,55 a	4,72±3,78 b	3,33±1,49 b	5,32±4,11 A
CB_Y2_pro	7,45±4,17 a	2,84±0,96 b	2,40±0,72 b	4,23±3,29 A
MF_Y1	8,37±4,43 a	3,67±1,10 b	3,22±1,33 b	5,09±3,48 A
MF_Y2	3,87±1,71 a	1,48±0,57 b	1,99±0,57 b	2,45±1,46 A
Témoin	3,87±0,57 a	2,74±0,48 b	2,58±0,28 b	3,06±0,73 A
Mono	4,81±1,10 a	2,83±0,20 b	2,57±0,50 b	3,40±1,22 A

MF-Y1 : parcelle mini-forêt de 1 an ; **MF-Y2** : parcelle mini-forêt de 2 ans ; **CB-Y1-elg** : parcelle en bande d'un an avec le point d'échantillonnage au milieu de deux bandes ; **CB-Y1-moy** : parcelle en bande d'un an avec le point d'échantillonnage moyennement proche de la bande ; **CB-Y1-pro** : parcelle en bande d'un an avec le point d'échantillonnage proche de la bande ; **CB-Y2-elg** : parcelle en bande de 2 ans avec le point d'échantillonnage au milieu de deux bandes ; **CB-Y2-moy** : parcelle en bande de 2 ans avec le point d'échantillonnage moyennement proche de la bande ; **CB-Y2-pro** : parcelle en bande de 2 ans avec le point d'échantillonnage proche de la bande ; **Témoin** : parcelle témoin dégradée/abandonnée ; **Mono** : parcelle en monoculture de manioc ou de maïs. . Les écarts-types ont été calculés par rapport aux 4 répétitions de chaque système.

Différentes lettres minuscules indiquent des différences significatives entre profondeurs pour un même système et différentes lettres majuscules indiquent des différences significatives entre systèmes toutes profondeurs confondues (p -value < 0.05).

Il n'y a pas d'effet du système sur la teneur en P_{ass} du sol (p -value= 0,21). Les parcelles de cajanus en bande à distance éloignée (CB_Y2_elg) présentent la valeur la plus élevée de P_{ass} , soit 5,60 mg/kg de sol sur 0-30 cm. Cela peut s'expliquer par le fait que pour la fixation de N, les légumineuses ont besoin de plus de P. Ces valeurs sont suivies des parcelles de cajanus en bande de 1 an à distance moyenne (CB_Y1_moy) avec une moyenne de 5,32 mg/kg de sol sur 0-30 cm. Les parcelles témoins dégradées/abandonnées (Témoin) et les parcelles monocultures (Mono) présentent les valeurs les plus faibles de P_{ass} , 3,06 et 3,40 mg/kg de sol respectivement (Tableau 8 ; Figure 17).

Il y a un effet significatif de la profondeur du sol sur les teneurs en P_{ass} ($p\text{-value} = 0,002$). Le P_{ass} du sol est significativement plus élevé sur 0-10 cm, avec une valeur moyenne de 6,66 mg/kg de sol comparé à 3,62 mg/kg de sol entre 10-20 cm et 2,69 mg/kg entre 20-30 cm (Tableau 8). Cette différence est significative quel que soit le système étudié.

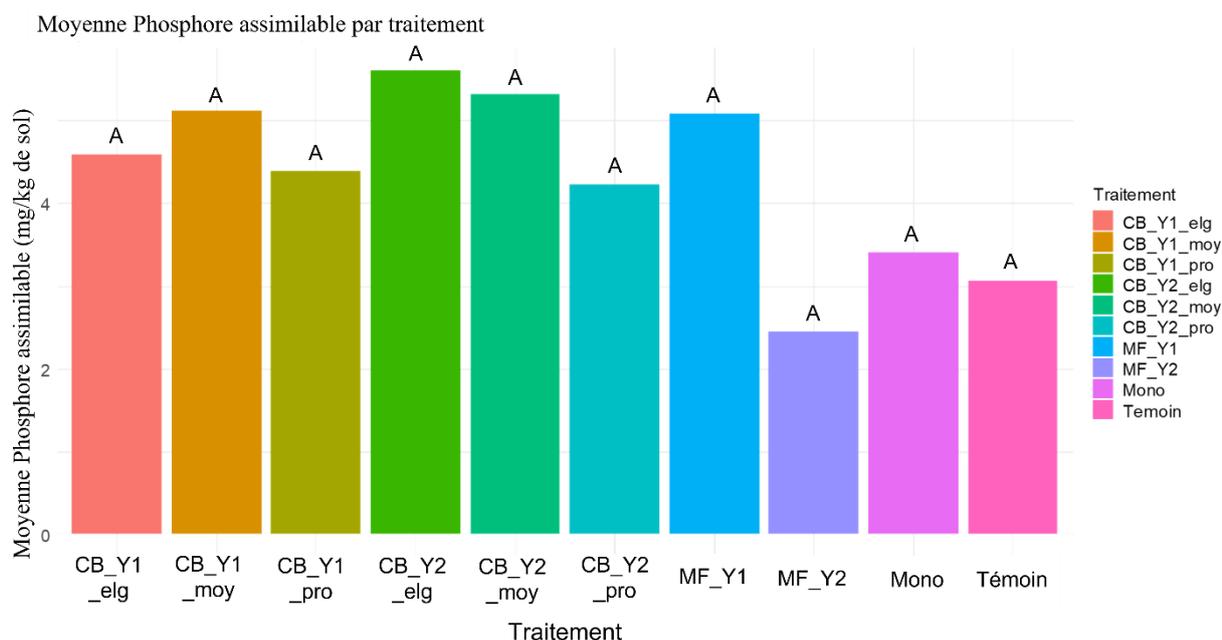


Figure 17: Moyenne teneur en phosphore assimilable sur la profondeur 0-30 cm

Différentes lettres majuscules indiquent des différences significatives entre système toutes profondeurs confondues ($p\text{-value} < 0.05$).

6.3.6 Impact du système sur le C/N du sol

Tableau 9 : Valeur moyenne du rapport C/N

C/N	Profondeur			
	0-10cm	10-20cm	20-30cm	0-30 cm
Traitement				
CB_Y1_elg	13,76±2,45 ab	11,46±1,27 bc	14,08±4,23 c	13,10±2,91 AB
CB_Y1_moy	11,38±2,50 ab	11,78±1,44 bc	10,18±0,67 c	11,11±1,71 BC
CB_Y1_pro	12,17±2,01 ab	11,57±1,26 bc	11,05±1,22 c	11,60±1,47 AB
CB_Y2_elg	10,22±0,94 ab	9,27±2,22 bc	9,19±0,72 c	9,56±1,41 C
CB_Y2_moy	10,83±0,39 ab	10,94±1,74 bc	10,42±1,13 c	10,73±1,12 BC
CB_Y2_pro	11,58±2,16 ab	10,74±0,75 bc	10,59±1,12 c	10,97±1,41 BC
MF_Y1	10,23±0,98 ab	9,64±0,78 bc	9,06±0,80 c	9,64±0,92 C
MF_Y2	10,88±1,03 ab	10,63±2,40 bc	9,54±0,96 c	10,35±1,57 BC
Témoin	11,01±2,65 ab	9,67±1,01 bc	10,33±1,39 c	10,34±1,74 BC
Mono	10,04±1,17 ab	8,74±1,21 bc	8,40±1,86 c	9,06±1,50 C

MF-Y1 : parcelle mini-forêt de 1 an ; **MF-Y2** : parcelle mini-forêt de 2 ans ; **CB-Y1-elg** : parcelle en bande d'un an avec le point d'échantillonnage au milieu de deux bandes ; **CB-Y1-moy** : parcelle en bande d'un an avec le point d'échantillonnage moyennement proche de la bande ; **CB-Y1-pro** : parcelle en bande d'un an avec le point d'échantillonnage proche de la bande ; **CB-Y2-elg** : parcelle en bande de 2 ans avec le point d'échantillonnage au milieu de deux bandes ; **CB-Y2-moy** : parcelle en bande de 2 ans avec le point d'échantillonnage moyennement proche de la bande ; **CB-Y2-pro** : parcelle en bande de 2 ans avec le point d'échantillonnage proche de la bande ; **Témoin** : parcelle témoin dégradée/abandonnée ; **Mono** : parcelle en monoculture de manioc ou de maïs. . Les écarts-types ont été calculés par rapport aux 4 répétitions de chaque système.

Différentes lettres minuscules indiquent des différences significatives entre profondeurs pour un même systèmes et différentes lettres majuscules indiquent des différences significatives entre systèmes toutes profondeurs confondues (p -value < 0.05).

Le rapport C/N est un indicateur de la capacité de la matière organique à se décomposer. En général, le rapport C/N devrait se situer entre 9 et 12 (CIRAD and MVAD 2006). Ici, les parcelles de cajanus en bande de 1 an à distance éloignée et proche (13,10 et 11,60 respectivement) présentent des valeurs significativement supérieures (p -value = $2,40e^{-5}$) à celles des parcelles de mini-forêt de 1 an (9,64), de cajanus en bande de 2 ans à distance éloignée (9,56) et des parcelles monocultures (9,06) (Tableau 9).

Les valeurs supérieures dans les parcelles de cajanus en bande de 1 an à distance éloignée et proche pourraient indiquer que les microorganismes du sol immobilisent l'azote disponible au lieu d'en apporter aux plantes (CIRAD and MVAD 2006). Par contre, les valeurs faibles dans les parcelles de mini-forêts, de cajanus en bande de 2 ans à distance éloignée et de monocultures pourraient indiquer que les matières organiques du sol sont rapidement décomposées et minéralisées par les microorganismes, entraînant une disponibilité immédiate de l'azote minéral pour les plantes (CIRAD and MVAD 2006). D'ailleurs, la valeur du C/N est significativement supérieure dans les profondeurs 20-30 cm par rapport à la profondeur 0-10 cm (p -value = 0,04), ce qui pourrait signifier une minéralisation plus rapide dans les couches superficielles du sol (Tableau 9).

Même s'il n'y a pas d'effet significatif du cajanus en mini-forêt (9,64 et 10,35 pour mini-forêts à 1 et 2 ans respectivement) sur le rapport C/N par rapport aux parcelles monocultures et parcelles témoins (9,06 et 10,34 respectivement), les parcelles en mini-forêts augmentent les teneurs de C et N dans les sols (Tableau 6 et 7), permettant un meilleur fonctionnement biologique et un approvisionnement en N sur la durée pour les plantes.

6.3.7 Impact du système sur le potassium (K)

Tableau 10 : Valeur moyenne de la teneur en potassium échangeable (exprimée en cmol^+/kg de sol)

K (cmol^+/kg)	Profondeur			
	0-10cm	10-20cm	20-30cm	0-30 cm
Traitement				
CB_Y1_elg	0,04±0,02 a	0,04±0,01 ab	0,03±0,01 b	0,04±0,01 ABC
CB_Y1_moy	0,03±0,01 a	0,03±0,02 ab	0,03±0,01 b	0,03±0,01 BC
CB_Y1_pro	0,05±0,02 a	0,03±0,01 ab	0,03±0,01 b	0,04±0,02 ABC
CB_Y2_elg	0,06±0,02 a	0,04±0,01 ab	0,04±0,01 b	0,05±0,02ABC
CB_Y2_moy	0,06±0,03 a	0,06±0,03 ab	0,04±0,01 b	0,05±0,03 AB
CB_Y2_pro	0,06±0,06 a	0,06±0,05 ab	0,05±0,04 b	0,06±0,05 AB
MF_Y1	0,05±0,01 a	0,03±0,01 ab	0,02±0,01 b	0,03±0,01 ABC
MF_Y2	0,05±0,01 a	0,03±0 ab	0,03±0,01 b	0,04±0,01 ABC
Témoin	0,03±0,01 a	0,02±0,01 ab	0,02±0,01 b	0,02±0,01 C
Mono	0,07±0,02 a	0,07±0,02 ab	0,05±0,01 b	0,06±0,02 A

MF-Y1 : parcelle mini-forêt de 1 an ; **MF-Y2** : parcelle mini-forêt de 2 ans ; **CB-Y1-elg** : parcelle en bande d'un an avec le point d'échantillonnage au milieu de deux bandes ; **CB-Y1-moy** : parcelle en bande d' 1un an avec le point d'échantillonnage moyennement proche de la bande ; **CB-Y1-pro** : parcelle en bande d' un an avec le point d'échantillonnage proche de la bande ; **CB-Y2-elg** : parcelle en bande de 2 ans avec le point d'échantillonnage au milieu de deux bandes ; **CB-Y2-moy** : parcelle en bande de 2 ans avec le point d'échantillonnage moyennement proche de la bande ; **CB-Y2-pro** : parcelle en bande de 2 ans avec le point d'échantillonnage proche de la bande ; **Témoin** : parcelle témoin dégradée/abandonnée ; **Mono** : parcelle en monoculture de manioc ou de maïs. . Les écarts-types ont été calculés par rapport aux 4 répétitions de chaque système.

Différentes lettres minuscules indiquent des différences significatives entre profondeurs pour un même systèmes et différentes lettres majuscules indiquent des différences significatives entre systèmes toutes profondeurs confondues ($p\text{-value} < 0.05$).

Il y a un effet significatif du système sur les teneurs en K ($p\text{-value} = 0,0001$). En effet, pour la profondeur 0-30 cm, les parcelles en monoculture (Mono) présentent des teneurs en K significativement supérieures (0,06 cmol^+/kg de sol) à celles des parcelles de cajanus en bande de 1 an à distance moyenne (CB_Y1_moy) (0,03 cmol^+/kg de sol) (Tableau 10). Cependant, les teneurs en K échangeable sont peu variables entre les autres systèmes à l'exception du témoin dégradé qui présente des teneurs significativement inférieurs (0,02 cmol^+/kg de sol) (Figure 18 ; Tableau 10).

Il y a également un effet significatif de la profondeur du sol (p -value = 0,0002), avec des valeurs moyennes de K qui diminuent, pour tous les traitements avec l'augmentation de la profondeur. Ainsi, quel que soit le système, les teneurs en K sont significativement supérieures dans la couche de sol superficielle (0-10 cm) par rapport à la couche plus profonde (20-30 cm) (Tableau 10).

- Entre 0-10 cm, la valeur moyenne est de 0,05 cmol⁺/kg de sol
- De 10 à 20 cm, la valeur moyenne est de 0,04 cmol⁺/kg de sol
- De 20 à 30 cm, la valeur moyenne est de 0,03 cmol⁺/kg de sol

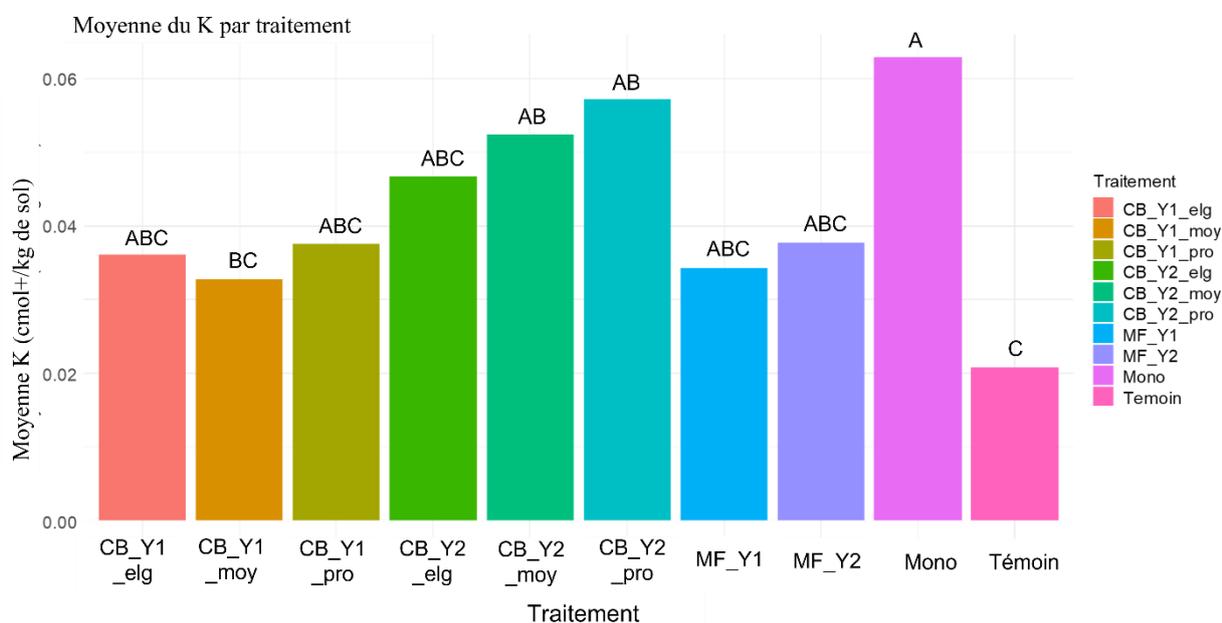


Figure 18: Moyenne teneur en potassium sur la profondeur 0-30 cm

Différentes lettres majuscules indiquent des différences significatives entre systèmes toutes profondeurs confondues (p -value < 0.05).

6.3.8 Impact du système sur le calcium (Ca)

Tableau 11 : Valeur moyenne de la teneur en calcium (exprimée en cmol^+/kg de sol)

Ca (cmol^+/kg)	Profondeur			
	0-10cm	10-20cm	20-30cm	0-30 cm
Traitement				
CB_Y1_elg	1,64±0,59 a	1,53±1,01 a	1,74±1,07 a	1,63±0,83 B
CB_Y1_moy	1,54±0,54 a	1,44±0,60 a	1,59±0,86 a	1,52±0,62 B
CB_Y1_pro	2,03±0,64 a	2,05±1,00 a	2,13±1,08 a	2,07±0,84 AB
CB_Y2_elg	2,34±0,54 a	2,29±1,08 a	2,33±1,18 a	2,32±0,88 AB
CB_Y2_moy	2,27±1,07 a	2,72±0,64 a	2,67±0,82 a	2,55±0,81 AB
CB_Y2_pro	2,45±1,29 a	2,76±1,45 a	3,04±1,23 a	2,75±1,22 AB
MF_Y1	2,11±0,23 a	2,24±0,58 a	2,09±0,14 a	2,15±0,34 AB
MF_Y2	1,62±0,93 a	2,25±1,25 a	2,20±1,40 a	2,02±1,13 AB
Témoin	1,65±1,04 a	1,68±1,03 a	1,70±1,24 a	1,68±1,00 B
Mono	3,03±1,51 a	3,66±1,94 a	3,08±1,62 a	3,25±1,57 A

MF-Y1 : parcelle mini-forêt de 1 an ; **MF-Y2** : parcelle mini-forêt de 2 ans ; **CB-Y1-elg** : parcelle en bande d'un an avec le point d'échantillonnage au milieu de deux bandes ; **CB-Y1-moy** : parcelle en bande d'un an avec le point d'échantillonnage moyennement proche de la bande ; **CB-Y1-pro** : parcelle en bande d'un an avec le point d'échantillonnage proche de la bande ; **CB-Y2-elg** : parcelle en bande de 2 ans avec le point d'échantillonnage au milieu de deux bandes ; **CB-Y2-moy** : parcelle en bande de 2 ans avec le point d'échantillonnage moyennement proche de la bande ; **CB-Y2-pro** : parcelle en bande de 2 ans avec le point d'échantillonnage proche de la bande ; **Témoin** : parcelle témoin dégradée/abandonnée ; **Mono** : parcelle en monoculture de manioc ou de maïs. . Les écarts-types ont été calculés par rapport aux 4 répétitions de chaque système.

Différentes lettres minuscules indiquent des différences significatives entre profondeurs pour un même système et différentes lettres majuscules indiquent des différences significatives entre systèmes toutes profondeurs confondues ($p\text{-value} < 0.05$).

Il y a un effet significatif du système sur les teneurs en calcium dans le sol ($p\text{-value} = 0,006$). En effet pour la couche 0-30 cm de sol, les parcelles en monoculture présentent des valeurs significativement supérieures (3,25 cmol^+/kg de sol) à celles des parcelles de cajanus en bande de 1 an à distance éloignée et moyenne (1,63 et 1,52 cmol^+/kg de sol) (Figure 19 ; Tableau 11). Une possible explication serait la localisation des parcelles en monocultures de manioc et de maïs en bordure de bloc, plus proche de la mer avec de nombreux résidus de roches calcaire observés sur les parcelles.

Tous systèmes confondus, il n'y a pas de différences significatives entre profondeurs ($p\text{-value} = 0.69$) (Tableau 11).

- Entre 0-10 cm, tous systèmes confondus, la valeur moyenne est de 2,06 cmol^+/kg de sol
- De 10 à 20 cm, tous systèmes confondus, la valeur moyenne est de 2,26 cmol^+/kg de sol
- De 20 à 30 cm, tous systèmes confondus, la valeur moyenne est de 2,25 cmol^+/kg de sol

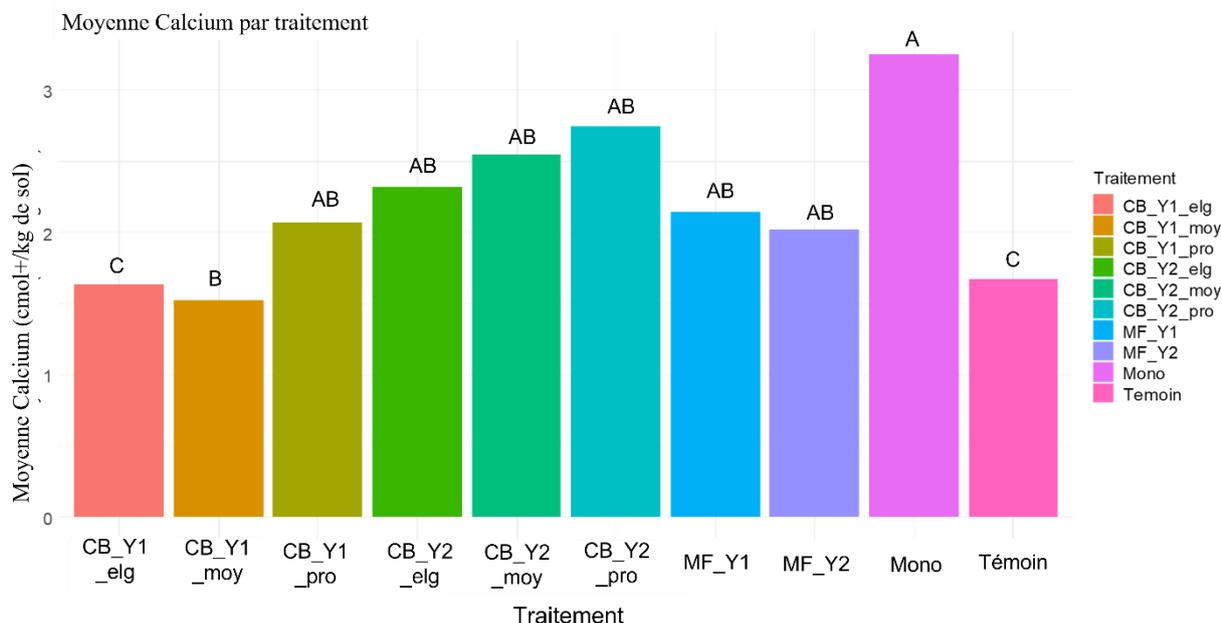


Figure 19 : Moyenne teneur en calcium sur la profondeur 0-30 cm

Différentes lettres majuscules indiquent des différences significatives entre systèmes toutes profondeurs confondues (p -value < 0.05).

6.3.9 Impact du système sur le sodium (Na)

Tableau 12 : Valeur moyenne de la teneur en sodium (exprimée en cmol+/kg de sol)

Na (cmol+/kg)	Profondeur			
	0-10cm	10-20cm	20-30cm	0-30 cm
Traitement				
CB_Y1_elg	0,011±0,01 b	0,011±0,01 a	0,014±0,01 a	0,012±0,01 ABC
CB_Y1_moy	0,012±0,01 b	0,009±0,01 a	0,010±0,01 a	0,010±0,01 ABC
CB_Y1_pro	0,008±0,01 b	0,011±0,01 a	0,009±0,01 a	0,009±0,01 ABC
CB_Y2_elg	0,013±0 b	0,020±0,01 a	0,022±0,01 a	0,018±0,01 ABC
CB_Y2_moy	0,019±0,01 b	0,024±0,01 a	0,028±0,01 a	0,024±0,01 AB
CB_Y2_pro	0,013±0 b	0,027±0 a	0,034±0,01 a	0,025±0,01 AB
MF_Y1	0,001±0 b	0,006±0 a	0,000 a	0,002±0 D
MF_Y2	0,001±0 b	0,012±0,02 a	0,008±0,01 a	0,007±0,01 CD
Témoin	0,010±0 b	0,013±0 a	0,016±0 a	0,013±0 ABC
Mono	0,016±0,01 b	0,029±0,01 a	0,026±0,01 a	0,024±0,01 AB

MF-Y1 : parcelle mini-forêt de 1 an ; **MF-Y2** : parcelle mini-forêt de 2 ans ; **CB-Y1-elg** : parcelle en bande d'un an avec le point d'échantillonnage au milieu de deux bandes ; **CB-Y1-moy** : parcelle en bande d' 1un an avec le point d'échantillonnage moyennement proche de la bande ; **CB-Y1-pro** : parcelle en bande d' un an avec le point d'échantillonnage proche de la bande ; **CB-Y2-elg** : parcelle en bande de 2 ans avec le point d'échantillonnage au milieu de deux bandes ; **CB-Y2-moy** : parcelle en bande de 2 ans avec le point d'échantillonnage moyennement proche de la bande ; **CB-Y2-pro** : parcelle en bande de 2 ans avec le point d'échantillonnage proche de la bande ; **Témoin** : parcelle témoin dégradée/abandonnée ; **Mono** : parcelle en monoculture de manioc ou de maïs. . Les écarts-types ont été calculés par rapport aux 4 répétitions de chaque système.

Différentes lettres minuscules indiquent des différences significatives entre profondeurs pour un même système et différentes lettres majuscules indiquent des différences significatives entre systèmes toutes profondeurs confondues (p -value < 0.05).

Il y a un effet significatif du système sur les teneurs en sodium dans le sol (p -value = $5,01e^{-9}$). En effet, pour la couche 0-30 cm, les parcelles de cajanus en bande de 2 ans à distance moyenne (CB_Y2_moy) présentent la valeur moyenne la plus élevée avec 0.024 cmol⁺/kg. Les parcelles de mini-forêts 1 et 2 ans (MF_Y1 et MF_Y2) présentent des valeurs significativement inférieures (0,002 cmol⁺/kg de sol et 0,006 cmol⁺/kg de sol respectivement) comparées aux autres systèmes cajanus en bande, monocultures et témoins (Tableau 12 ; Figure 20). A ce stade, nous ne trouvons pas d'explications évidentes à ces différences.

Il y a également un effet significatif de la profondeur des sols sur les teneurs en sodium du sol avec des valeurs pour la couche 0-10 cm qui sont significativement inférieures aux autres couches 10-20 cm et 20-30 cm et cela pour tous les systèmes (p -value = 0,01) (Tableau 12). En effet, il y a une plus forte concentration en profondeur :

- Entre 0-10 cm, tous systèmes confondus la valeur moyenne est de 0,010 cmol⁺/kg de sol
- De 10 à 20 cm, tous systèmes confondus, la valeur moyenne est de 0,016 cmol⁺/kg de sol
- De 20 à 30 cm, tous systèmes confondus, la valeur moyenne est de 0,016 cmol⁺/kg de sol

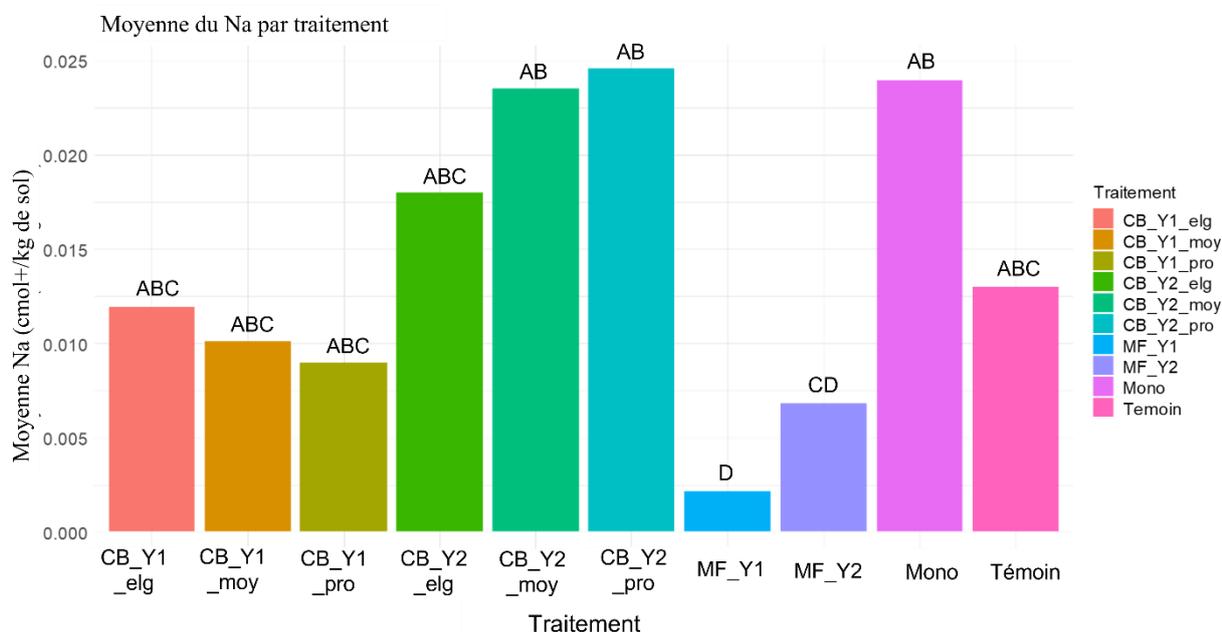


Figure 20 : Moyenne teneur en sodium sur la profondeur 0-30 cm

Différentes lettres majuscules indiquent des différences significatives entre systèmes toutes profondeurs confondues (p -value < 0.05).

6.3.10 Impact du système sur le stock de carbone (COS), stock d'azote total (NOS)

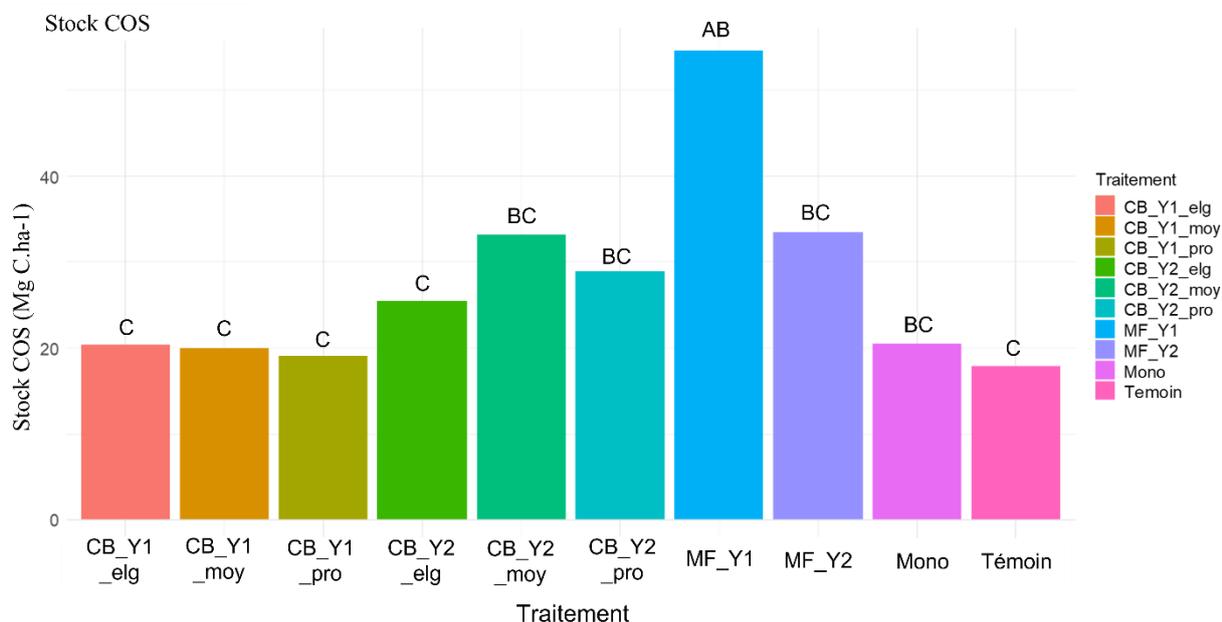


Figure 21: Stock COS sur la profondeur de 0-30 cm (exprimé en Mg C. ha⁻¹)

Différentes lettres majuscules indiquent des différences significatives entre systèmes toutes profondeurs confondues (p -value < 0.05).

Tableau 13 : Moyenne de stock COS par pratique sur la profondeur 0-30 cm

Traitement	Moyenne stock COS (Mg C. ha ⁻¹)
MF_Y1 et MF_Y2	44,02 A
CB_Y1 et CB_Y2	24,49 B
Témoïn	17,84 B
Mono	20,50 B

Différentes lettres majuscules indiquent des différences significatives entre systèmes toutes profondeurs confondues (p -value < 0.05).

Il y a un effet significatif du système sur le stock de COS (0-30 cm) ($p\text{-value} = 8,98e^{-5}$). En effet, le stock COS le plus élevé se retrouve dans les parcelles de mini-forêts de 1 an (MF_Y1) avec $54,55 \text{ Mg C. ha}^{-1}$ pour la couche 0-30 cm de profondeur (Figure 21). Ces valeurs de stocks sont significativement supérieures à celles des parcelles témoins ($3,95 \text{ g/kg}$ de sol), des parcelles de cajanus en bandes à 1 an ($4,44 \text{ g/kg}$ de sol, $4,39 \text{ g/kg}$ de sol et $4,15 \text{ g/kg}$ de sol respectivement pour les 3 distances échantillonnées : éloignée, moyenne et proche) ; ainsi que par rapport aux parcelles de cajanus en bande de 2 ans en position éloignée ($6,06 \text{ g/kg}$ de sol).

De plus, la moyenne du stock de COS par pratique (Tableau 13) confirme cet effet significatif du système sur les stocks COS ($p\text{-value} = 0,03$). En effet, les mini-forêts de 1 an et 2 ans présentent des valeurs significativement supérieures ($44,02 \text{ Mg C. ha}^{-1}$) comparée aux autres pratiques de cajanus en bande ($24,49 \text{ Mg C. ha}^{-1}$), de monocultures ($20,50 \text{ Mg C. ha}^{-1}$) et témoin ($17,54 \text{ Mg C. ha}^{-1}$). Ces résultats peuvent s'expliquer par l'augmentation des retours au sol de matière organique, notamment des feuilles de cajanus, et au non-travail du sol durant les années de jachère.

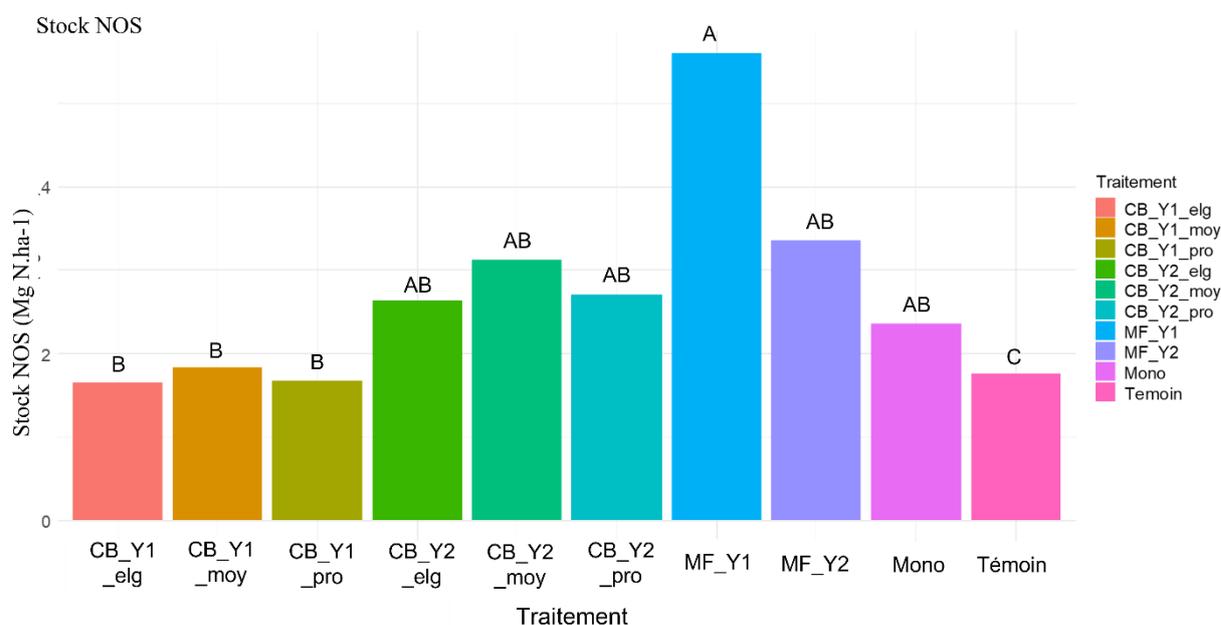


Figure 22 : Stock de NOS sur la profondeur 0-30 cm (exprimé en Mg N. ha^{-1})

Différentes lettres majuscules indiquent des différences significatives entre systèmes toutes profondeurs confondues ($p\text{-value} < 0.05$).

Tableau 14 : Moyenne de stock NOS par pratique sur la profondeur 0-30 cm

Traitement	Moyenne stock NOS (Mg N. ha ⁻¹)
MF_Y1 et MF_Y2	4,47 A
CB_Y1 et CB_Y2	2,27 B
Témoin	1,76 B
Mono	2,36 AB

Différentes lettres majuscules indiquent des différences significatives entre systèmes toutes profondeurs confondues (p -value < 0.05).

Il y a un effet significatif du système sur le stock de NOS (0-30 cm) (p -value = $1,18 \times 10^{-5}$). En effet, les stocks NOS dans les parcelles de mini-forêt de 1 an présentent des valeurs significativement supérieures ($5,59 \text{ Mg N. ha}^{-1}$) par rapport aux stocks dans les parcelles de cajanus en bande de 1 an ($1,65 \text{ Mg N. ha}^{-1}$, $1,83 \text{ Mg N. ha}^{-1}$ et $1,67 \text{ Mg N. ha}^{-1}$ respectivement pour les 3 distances : éloignée, moyenne et proche) ainsi que celles des parcelles témoin ($1,76 \text{ Mg N. ha}^{-1}$).

La moyenne du stock NOS par pratique (Tableau 14) montre aussi que ces valeurs sont significativement supérieures (p -value=0,02) dans les parcelles de mini-forêts ($4,47 \text{ Mg N. ha}^{-1}$) par rapport aux autres pratiques cajanus en bande ($2,27 \text{ Mg N. ha}^{-1}$), monocultures ($2,36 \text{ Mg N. ha}^{-1}$) et témoins ($1,76 \text{ Mg N. ha}^{-1}$). Cela pourrait être dû à l'utilisation d'azote par les cultures et une absence d'apport en matière organique comparées aux parcelles de mini-forêts et cajanus en bande qui bénéficient de retour de litières riches en azote.

6.4 Conclusion

Les résultats montrent que les parcelles de mini-forêts de 1 an, sont efficaces pour améliorer la qualité du sol en termes de CO et N_{tot} , ce qui est essentiel pour la fertilité du sol des parcelles dégradées/abandonnées (témoin). En prenant en compte l'historique des parcelles, les résultats sur les systèmes de cajanus en bande sont en cohérence avec le raisonnement des producteurs quant à maintenir la fertilité du sol car les valeurs pour les différentes mesures sont assez proches de celles des monocultures.

La diminution des stocks de carbone dans les mini-forêts entre 1 an et 2 ans peut s'expliquer par une plus forte minéralisation du carbone du sol liée à l'augmentation du cycle biologique telle qu'illustrée par l'augmentation de la macrofaune du sol. La diminution des stocks d'azote entre les mini-forêts de 1 an et 2 ans, bien que notable n'est pas significative. Par ailleurs, cela pourrait s'expliquer par les historiques des parcelles que nous ne maîtrisons pas. En effet, les parcelles de 2 ans ne sont pas la continuité de celles de 1 an (approche synchronique et non diachronique). Aussi, les faibles valeurs dans tous les systèmes du rapport C/N indiquent une plus grande disponibilité de l'azote dans le sol mais cela indique également une vitesse de décomposition assez rapide de la matière organique du sol.

Les parcelles de cajanus en bande de 2 ans présentent une plus grande disponibilité des nutriments (CO, N_{tot} , P_{ass} et K et bases échangeables Ca et Na comparés aux cajanus en bande de 1 an). Les parcelles monocultures et témoins abandonnés/dégradés montrent une faible fertilité en P_{ass} et N_{tot} . La variation des nutriments avec la profondeur indique une accumulation du CO et de P_{ass} dans les couches superficielles du sol, et une distribution plus uniforme de l'azote total suivant la profondeur. En comparant les différentes pratiques agroécologiques, les parcelles de mini-forêts 1 an et 2 ans présentent des stocks plus élevés de carbone organique (COS) et azote (NOS).

Ces différentes observations suggèrent la mise en place de mini-forêts de *Cajanus cajan* est un mode de gestion des parcelles qu'il faudrait surtout renforcer auprès des producteurs pour la restauration de la fertilité des sols. Les mini-forêts contribuent à l'amélioration de CO et de N_{tot} du sol.

Cette étude montre que la mise en place de mini-forêts dans d'autres régions de Madagascar aux conditions pédoclimatiques avoisinantes, pourrait être une technique agroécologique adaptée pour l'amélioration de CO et N_{tot} du sol. Cette tendance se confirme également dans les systèmes de cajanus en bande. Cela demande qu'il n'y ait pas un dessouchage des cajanus à leur coupe et que les résidus (feuilles) soient bien incorporés aux sols et non exportés hors des parcelles.

7. Partie 3 : Etude sur la fixation symbiotique de l'azote atmosphérique N₂ par le *Cajanus cajan*

Dans les BAE, *Cajanus cajan* est utilisé et valorisé pour sa fonction de légumineuse en tant que plante fixatrice d'azote atmosphérique et source d'apport en azote pour le système. A cet effet, un marquage isotopique ¹⁵N a été effectué pour estimer cette fixation symbiotique de N₂ atmosphérique et cet apport en azote (Bouillet et al. 2008). La méthode est basée sur la comparaison des valeurs de l'abondance isotopique ¹⁵N du cajanus avec une espèce non fixatrice, c'est-à-dire la comparaison de l'excès isotopique (AE) par rapport à la valeur naturelle du ¹⁵N dans l'air. L'espèce non fixatrice choisie est le manioc.

7.1 Parcelles sélectionnées

Pour cette étude, neuf parcelles ont été sélectionnées :

- 3 parcelles pures de cajanus (mini-forêt de 2 ans) : **cajanus pur**
- 3 parcelles pures de manioc : **manioc pur**
- 3 parcelles de cultures associées de cajanus de 2 ans et manioc : **cajanus+manioc**

7.2 Méthodologie de marquage

Voici les étapes suivies pour le marquage isotopique :

- Délimitation de 100 m² à marquer pour chaque parcelle
- Prélèvement de sols pour analyse des teneurs en nutriments (qui servira de base pour la détermination des éléments nutritifs dans le sol et nécessaire aux besoins du cajanus)
- Echantillonnage des feuilles avant marquage
- Marquage de la surface délimitée avec un arrosoir : soit 8.1 g d'engrais enrichi en ¹⁵N isotopique 98% dilué dans 100 L d'eau pour chaque 100 m²
- Echantillonnage des feuilles de cajanus et manioc sur les mêmes plants après 90 jours



Photo 3 : Marquage ^{15}N du sol avec l'utilisation d'un arrosoir, a : parcelle de cultures associées de cajanus et manioc ; b : parcelle pure de manioc

7.3 Mode de prélèvement des feuilles

Dans les parcelles pures de cajanus, l'échantillonnage a été fait sur cinq arbustes disposés en croix : 20 feuilles par arbustes ont été prélevés, soit cinq feuilles dans chaque direction (Nord-Sud-Est-Ouest).

Dans les parcelles pures de manioc, l'échantillonnage s'est fait sur 10 plants disposés en diagonale et en croix : quatre feuilles par plant, une dans chaque direction.

Dans les parcelles associées de cajanus en bande et de manioc, les feuilles de cajanus ont été prélevées sur cinq arbustes alignés, avec 20 feuilles par arbuste. Pour le manioc, les feuilles ont été prélevées à trois distances différentes par rapport à la bande de cajanus : le premier plant près de la bande, le deuxième à une distance moyenne, et le dernier entre deux bandes (Figure 23).

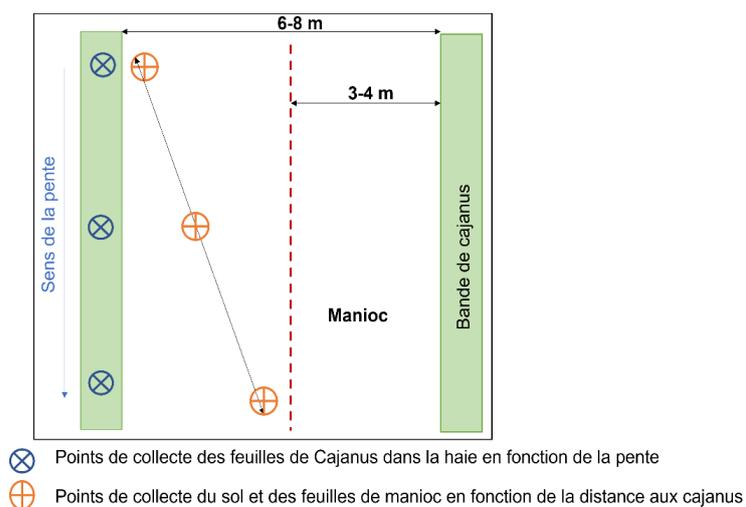


Figure 23 : Collecte du sol et des feuilles en fonction de la distance à la haie de cajanus et du sens de la pente dans les parcelles en bandes.

7.4 Analyse des feuilles

La première collecte de feuilles a été faite avant le marquage ^{15}N . La deuxième collecte a été effectuée 90 jours après. Les feuilles avant et après marquage ont été analysées pour mesurer les teneurs en N, ^{15}N et C.

Ensuite, le taux d'azote atmosphérique fixé a été calculé à partir de l'équation suivante (Bouillet et al. 2008) :

$$\%Ndfa = 100 \left(1 - \frac{\frac{(N_{Ffinal} AE_{Ffinal} - N_{Finitial} AE_{Finitial})}{(N_{Ffinal} - N_{Finitial})}}{\frac{(N_{REFfinal} AE_{REFfinal} - N_{REFinitial} AE_{REFinitial})}{(N_{REFfinal} - N_{REFinitial})}} \right)$$

$$\text{Avec } AE = {}^{15}\text{N} * 100 / ({}^{15}\text{N} + {}^{14}\text{N}) - 0.003663$$

%Ndfa pourcentage d'azote dérivé de la fixation atmosphérique

$N_{Finitial}$ teneur en azote dans le cajanus avant le marquage

N_{Ffinal} teneur en azote dans le cajanus après 90 jours

$N_{REFinitial}$ teneur en azote dans le manioc avant le marquage

$N_{REFfinal}$ teneur en azote dans le manioc après 90 jours

$AE_{Finitial}$ pourcentage d'excès atomique du cajanus avant le marquage

AE_{Ffinal} pourcentage d'excès atomique du cajanus après 90 jours

$AE_{REFinitial}$ pourcentage d'excès atomique du manioc avant le marquage

$AE_{REFfinal}$ pourcentage d'excès atomique du manioc après 90 jours

Les feuilles de manioc ont été collectées à trois distances différentes du cajanus afin d'évaluer l'étendue du transfert : à proximité, à distance intermédiaire et à distance éloignée. Ce point le plus éloigné se situe au milieu de deux bandes.

Le pourcentage d'azote transféré du cajanus vers le manioc est estimé à partir de l'équation (Snoeck, Zapata, and Domenach 2000) :

$$\%N_{dft} = 100 \times \frac{\delta^{15}N_{REF} - \delta^{15}N_{REFass}}{\delta^{15}N_{REF} - \delta^{15}N_{fixation}}$$

Avec $\%N_{dft}$: pourcentage d'azote fourni au manioc par la fixation

$\delta^{15}N_{REF}$: $\delta^{15}N$ du manioc pur

$\delta^{15}N_{REFass}$: $\delta^{15}N$ du manioc associé au cajanus

$\delta^{15}N_{fixation}$: $\delta^{15}N$ du cajanus pur

7.5 Résultats

Tableau 15 : Pourcentage d'azote dérivé de la fixation atmosphérique ($\%N_{dfa}$) dans les parcelles avec cajanus

Traitement	Manioc pur (Feuilles manioc)	Cajanus pur (Feuilles cajanus)	Cajanus+manioc (Feuilles cajanus)
$\%^{15}N_{initial}$	0,37	0,37	0,37
$\%N_{initial}$	4,09	3,56	3,78
$AE_{initial}$	8,42	9,39	8,92
$\%^{15}N_{final}$	0,45	0,39	0,38
$\%N_{final}$	4,08	4,14	4,25
AE_{final}	9,95	8,58	8,18
	$\%N_{dfa}$	100	100

$\%N_{dfa}$ pourcentage d'azote dérivé de la fixation atmosphérique ; $N_{Finitial}$ teneur en azote dans le cajanus avant le marquage ; N_{Ffinal} teneur en azote dans le cajanus après 90 jours ; $N_{REFinitial}$ teneur en azote dans le manioc avant le marquage ; $N_{REFfinal}$ teneur en azote dans le manioc après 90 jours ; $AE_{Finitial}$ pourcentage d'excès atomique du cajanus avant le marquage ; AE_{Ffinal} pourcentage d'excès atomique du cajanus après 90 jours ; $AE_{REFinitial}$ pourcentage d'excès atomique du manioc avant le marquage ; $AE_{REFfinal}$ pourcentage d'excès atomique du manioc après 90 jours

Dans les parcelles de cajanus pur (mini-forêts), ou en cultures associées (cajanus+manioc) le $\%N_{dfa}$ est estimé à 100%.

Tableau 16 : Apport, sur 2 ans, d'azote dérivé de la fixation atmosphérique (exprimée en g N/plant)

Traitement	Cajanus pur	Cajanus+manioc (Bas de pente)	Cajanus+manioc (Haut de pente)
Biomasse feuille de cajanus (kg)	0,118	0,163	0,127
%Ndfa	100	100	100
g N/plant dérivé de fixation	4,94	6,97	5,45
Densité de plantation (ind/ha)	3464	1216	1187
Kg N/ha dérivé des feuilles de cajanus	17,1	8,5	6,5
Equivalence urée 46% (kg/ha)	37,2	18,4	14,0
Equivalence en NPK 11-22-16 (kg/ha) pour 11% d'apport N	155,5	77,0	58,8

Les résultats montrent que dans les parcelles de cajanus purs (mini-forêts) il y a moins d'azote fixé (4,94 g N/arbre) que dans les parcelles de cajanus associés (6,97 g N/arbre si parcelles en bas de pente et 5,45 g N/arbre si les parcelles en haut de pente). Cependant, en tenant compte de la densité de plantation, l'apport total d'azote sur 2 ans est plus élevé dans les parcelles de cajanus purs, atteignant 17,11 kg N/ha, contre 8,48 kg N/ha et 6,47 kg N/ha dans les parcelles associées.

Ces apports d'azote dérivés sur 2 ans de la fixation équivalent, à environ 37 kg/ha d'urée à 46 % dans les parcelles de cajanus purs, et de 14 à 18 kg/ha d'urée dans les parcelles de cajanus associées. Ils correspondent également à une application - hors apport de P et K - de 155 kg/ha d'engrais NPK (11-22-16) dans les parcelles de cajanus purs, ou de 59 à 77 kg/ha dans les parcelles associées.

On peut souligner que cette quantité d'azote dérivée de la fixation est sous-estimée car l'étude n'a pas pris en compte les tiges et les racines de cajanus. Toutefois les tiges étant utilisées comme combustibles, les N contenus dans les biomasses ne retournent pas au sol, dans tous les cas de figure. Par contre, il serait intéressant de quantifier l'azote dérivé de la fixation présent dans les racines fines et souches de cajanus.

Tableau 17: Pourcentage d'azote dérivé du transfert du cajanus vers le manioc (%Ndft) dans les parcelles associées de cajanus+manioc

Distance du manioc au cajanus	Eloignée	Moyenne	Proche
%Ndft	72,96	42,46	51,73

Les résultats montrent qu'il y a un transfert de l'azote fixé par le cajanus vers le manioc (Tableau 17). En moyenne, le transfert est le plus élevé (72.96%) quand le manioc est éloigné du cajanus (environ à 5 m du pied du cajanus) mais il varie suivant la distance au cajanus. Ce résultat peut être expliqué par le fait qu'à 2 ans, le système racinaire du cajanus est très développé et pouvant aller latéralement jusqu'à 4 m, voire plus, selon les observations sur terrain (Photo 4). Par ailleurs, les observations de terrain laissent à penser que les densités de racines fines de cajanus sont les plus fortes soit au pied de l'arbre soit dans les zones les plus éloignées pour maximiser l'absorption des ressources en eau et en nutriments.



Photo 4 : Racines latérales du cajanus (longueur : 3,20 m sur la photo)

Les données acquises ne suffisent pas à expliquer précisément le mécanisme de transfert d'azote du cajanus vers le manioc. Cependant, plusieurs mécanismes peuvent être envisagés :

- Un transfert direct via les exsudats racinaires : en supposant que la forte compétition entre les racines du cajanus réduit la disponibilité en eau et en nutriments sous ses pieds, les racines du cajanus pourraient atteindre celles du manioc (Bordron et al. 2021)
- Un transfert via les dépôts de litières de cajanus : en supposant qu'il y a des racines de manioc qui se développent sous les cajanus (Paula et al. 2015)
- Un transfert via la décomposition et renouvellement très rapide des racines très fines de cajanus (Paula et al. 2015)
- Si les plantes de cajanus et de manioc sont directement connectées par des réseaux mycorhiziens communs (Paula et al. 2015)

7.6 Conclusion

Les résultats montrent que le cajanus est un fixateur d'azote très efficace qu'il soit en culture pure ou associée. En effet, l'azote présent dans les feuilles de cajanus de 2 ans provient à 100% de la fixation d'azote atmosphérique. Une telle fixation est rendue potentiellement possible par les teneurs assez élevées de phosphore assimilable dans les sols, cet élément étant indispensable pour la réduction du N₂ atmosphérique (fourniture d'ATP). Les résultats indiquent une entrée non négligeable de N dans le système améliorant la durabilité dans un contexte où les producteurs n'apportent pas de matières fertilisantes dans leurs parcelles (organiques ou minérales). Cela souligne encore l'importance de ne pas dessoucher le cajanus lors de la coupe et de restituer les résidus (feuilles) aux sols.

Par ailleurs, un transfert d'azote du cajanus vers les maniocs, même les plus éloignés (5 m de distance) a été observé. Ce résultat met en évidence que les espacements actuels entre bandes de cajanus utilisés par les producteurs paraissent adéquats pour que les cultures associées puissent bénéficier des apports de N de la légumineuse. Les producteurs pourraient aussi augmenter l'espacement entre les bandes mais à condition qu'ils en fassent de même pour les largeurs des bandes de cajanus. Cela afin de garder à la fois l'effet des apports de N mais aussi pour la protection aux érosions éoliennes.

8. Partie 4 : Exploration racinaire en profondeur de *Cajanus cajan*

La survie des arbustes de *Cajanus cajan* dans les conditions environnementales extrêmes de la région pourrait être expliqué par sa capacité racinaire, c'est-à dire une racine pivotante et profonde pouvant explorer une surface souterraine importante pour l'absorption de l'eau et des nutriments. Ainsi, l'objectif est de connaître cette profondeur maximale du sol que les racines du *Cajanus cajan* peuvent atteindre. Dans un contexte où les reboisements sont globalement des échecs dans la région, il est important de mieux comprendre les stratégies d'exploration racinaire.

8.1 Parcelles sélectionnées

Les parcelles sélectionnées pour prélever les racines fines sont

- 4 parcelles de cajanus en bande de 2 ans en haut de pente
- 4 parcelles de cajanus en bande de 2 ans en bas de pente
- 4 mini-forêt de 2 ans en haut de pente
- 4 mini-forêt de 2 ans en bas de pente

Tableau 18: Liste des systèmes pour la collecte de racines fines de cajanus

<i>Parcelles</i>	<i>Système</i>
Cajanus en bande en bas de pente (n= 4)	CB_BP
Cajanus en bande en haut de pente (n= 4)	CB_HP
Mini-forêt en haut de pente (n= 4)	MF_HP
Mini-forêt en bas de pente (n= 4)	MF_BP

8.2 Mode de prélèvement des sols

Dans les parcelles de cajanus en bande, les échantillons ont été prélevés à trois points le long de la ligne de cajanus.

Dans les parcelles de mini-forêts, on a utilisé la méthode du carré de Voronoï (Figure 24) pour choisir les points de prélèvement. Les deux points de prélèvement sont le plus proche (P1) et le plus éloigné (P4), chaque point étant prélevé sur 2 arbustes différents.

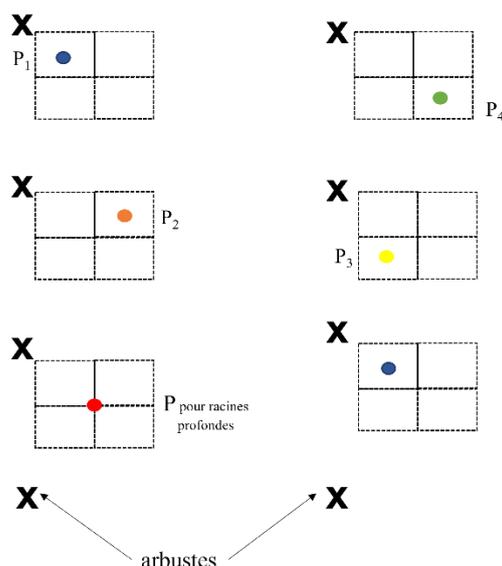


Figure 24 : Carré de Voronoï, P1 et P4 sont les points de prélèvements

Les prélèvements ont été réalisés jusqu'à une profondeur maximale de 2 mètres, à l'aide d'une tarière motorisée (Photo 5). Au-delà de cette profondeur, la présence d'une formation rocheuse a empêché de creuser plus profondément (Photo 6). La profondeur a été divisée en six couches : 0-15 cm, 15-30 cm, 30-50 cm, 50-100 cm, 100-150 cm, 150-200 cm.



Emergence de la tarière



Tarière

Photo 5 : Utilisation de tarière motorisée pour le prélèvement de sols



Formation rocheuse à 2,5 m



Roche en profondeur

Photo 6 : Formation rocheuse dans les profondeurs du sol

8.3 Mode de séparation des racines fines au sol

Les sols prélevés à chaque profondeur ont été récupérés puis pesés. Chaque échantillon a été mélangé uniformément puis a été divisé en deux sous-échantillons représentant respectivement 10% et 90% de la masse totale.

Le premier sous-échantillon (10 %) a été lavé et tamisé à travers une maille de 1 mm x 1 mm, puis de 0,5 mm x 0,5 mm. Toutes les racines récupérées ont été séparées en deux groupes : celles de moins de 1 cm de longueur et celles de plus de 1 cm. Le second sous-échantillon (90 %) a été également lavé et tamisé de la même manière, mais seules les racines de plus de 1 cm ont été récupérées. Enfin, toutes les racines ont été pesées avec une balance de précision 0.0001g.

8.4 Résultats

Tableau 19 : Profondeur maximale d'enracinement du cajanus

Traitement	Profondeur zone rocheuse (cm)	Profondeur maximale d'enracinement (cm)
CB_BP	185,83	165,83
CB_HP	193,84	179,23
MF_BP	190,00	179,37
MF_HP	190,00	185,00

CB_BP : cajanus en bande en bas de pente ; *CB_HP* : cajanus en bande en haut de pente ; *MF_BP* : mini-forêt en bas de pente ; *MF_HP* : mini-forêt en haut de pente

La zone rocheuse se trouve en moyenne dans les environs de 180-190 cm de profondeur. Dans certaines parcelles, la zone rocheuse se trouvait à moins de 150 cm mais pouvait également être atteinte à 290 cm de profondeur.

La profondeur maximale d'enracinement du cajanus s'observe généralement entre 150 et 200 cm. Dans les parcelles situées en haut de pente, cette profondeur est légèrement plus importante que celles situées en bas de pente.

La profondeur maximale d'enracinement du cajanus est limitée par la présence d'un horizon rocheux sous-jacent (Photo 6). On peut penser que les racines du cajanus ne peuvent s'étendre plus profondément que la profondeur de cet horizon rocheux. Mais il n'a pas été possible de procéder à une collecte de sols en dessous de cet horizon rocheux. Aussi nous ne savons pas avec certitude qu'aucune racine ne peut franchir cette barrière. Ceci étant, cette contrainte physique pourrait expliquer les difficultés rencontrées par le GRET et le CTAS pour l'introduction de grands arbres dans la région, ceux-ci ayant nécessairement besoin d'un système racinaire profond pour assurer leur approvisionnement en eau et leur croissance. Un préalable à l'extension des systèmes à base de cajanus dans d'autres régions de Madagascar est que la profondeur du sol soit suffisante pour une exploration racinaire permettant l'absorption de l'eau et des nutriments par la plante dans les zones où les précipitations sont mal réparties au cours de l'année.

9. Partie 5 : Quantification de la biomasse aérienne et racinaire du *Cajanus cajan*

La ressource en bois de chauffage est extrêmement limitée dans la région dû à l'absence de formations boisées exploitables (les rares forêts présentes sont *fady*). Ainsi, les villageois parcourent souvent 10 à 30 km pour récolter du bois dans les forêts naturelles restantes plus au nord de la zone. L'introduction du *Cajanus cajan* dans les BAE a permis de répondre partiellement à ces besoins en fournissant une source locale de bois. Les tiges, et parfois une partie de la souche, sont utilisés pour ces usages domestiques. L'objectif dans cette partie est donc d'estimer la quantité de biomasse que le cajanus peut fournir suivant le système adopté.

9.1 Parcelles sélectionnées

Les traitements étudiés pour la partie biomasse totale de cajanus

- 4 parcelles de mini-forêt
- 4 parcelles de cajanus en bande en haut de pente
- 4 parcelles de cajanus en bande en bas de pente

Tableau 20: Liste des systèmes pour les biomasses destructives de cajanus

<i>Parcelles</i>	<i>Systèmes</i>
Cajanus en bande de 2 ans en bas de pente	CB_BP
Cajanus en bande de 2 ans en haut de pente	CB_HP
Mini-forêt de 2 ans	MF

9.2 Inventaire des arbustes de cajanus

Un inventaire des arbustes dans chaque parcelle a été réalisé afin de sélectionner les arbustes à couper et dessoucher. Cet inventaire a consisté à mesurer la circonférence à hauteur de 10 cm du collet de l'arbuste, ainsi que sa hauteur totale. Ensuite, pour chaque parcelle, les arbustes ont été regroupés en 10 classes de surface terrière en fonction de leur surface terrière. Ensuite 10 arbustes par parcelle soit 40 par système ont été coupés, chacun d'eux représentant une de ces classes.

Dans les parcelles de mini-forêt, tous les arbustes ont été mesurés ainsi que la superficie de la parcelle. Dans les parcelles de cajanus en bande, la longueur de la bande a été mesurée et chaque arbuste a été inventorié.

Dans le cas où il y avait plusieurs pieds pour un individu de cajanus, les surfaces terrières à 10 cm de hauteur ont été additionnées et la circonférence équivalente a été calculée (Bouillet et al., 2013)

9.3 Echantillonnage des arbustes

La biomasse totale de *Cajanus cajan* comprend 4 compartiments distincts : feuilles, tiges, tronc et racines. La procédure d'échantillonnage de chaque arbuste est la suivante :

- Mesurer la largeur du houppier en perpendiculaire
- Couper l'arbuste au niveau du collet
- Mesurer la hauteur totale de l'arbuste et la taille du houppier
- Diviser l'arbuste en deux au niveau de la moitié du houppier : la partie supérieure et la partie inférieure
- Prélever 40 feuilles de partie supérieure, les peser et peser l'ensemble des feuilles
- Répéter la même procédure pour les feuilles de la partie inférieure
- Séparer les tiges du tronc principal
- Peser l'ensemble des tiges de chaque partie, prélever des échantillons puis faire de même avec le tronc
- Sur les 10 arbustes, dessoucher uniquement 5 d'entre eux, prélever les racines contenues dans un carré de 50 cm x 50 cm, peser l'ensemble puis prélever un échantillon



Séparation de l'arbuste en 2 parties : supérieure et inférieure



Tiges



Feuilles



Souche

Photo 7 : Echantillonnage de la biomasse du cajanus

9.4 Résultats

Tableau 21 : Biomasse aérienne des cajanus dans les différents systèmes

<i>Système</i>	CB_BP	CB_HP	MF
Hauteur totale (cm)	188,3±49,7	169,2±34,2	196,5±44,9
Feuilles (g. arbre ⁻¹)	172,2±82,2	129,4±62,6	137,8±114,9
Tiges (g. arbre ⁻¹)	493,0±252,3	418,0±149,2	537,0±154,9
Tronc (g. arbre ⁻¹)	254,5±153,0	188,2±78,7	298,6±102,3
Souche (g. arbre ⁻¹)	221,8±176,5	183,6±143,2	270,3±185,7
Densité de plantation (arbre. ha ⁻¹)	1217	1187	3464
Bois : tige + tronc+ souche (kg. ha ⁻¹)	1032	879	3818
Bois : tige +tronc (kg. ha ⁻¹)	792	680	2878

CB_BP : cajanus en bande en bas de pente ; **CB_HP** : cajanus en bande en haut de pente ; **MF** : mini-forêt

Dans les parcelles de cajanus en bandes, la quantité de bois (tige, tronc et souche) récoltée après 2 ans est d'environ 1032 kg/ha dans les bas de pente contre 880 kg/ha sur les hauts de pente. Pour une meilleure durabilité des systèmes, il est recommandé de ne pas exploiter les souches. Ainsi, en ne considérant que les tiges et les troncs, la récolte peut être estimée à 792 kg/ha dans les bas de pente et 680 kg/ha sur les hauts de pente. Cette différence entre les deux localisations pourrait s'expliquer par une plus grande disponibilité de ressources dans les zones en bas de pente. Dans les mini-forêts, la quantité de bois récoltée est plus importante, car en effet, elle est d'environ 3818 kg/ha si on considère avec la souche et d'environ 2878 kg/ha sans la souche.

Dans ces deux systèmes, la coupe se fait en deuxième année car en première année, la plantation est orientée sur la production des grains. Après la deuxième année, au-delà de la faible longévité naturelle de cette espèce (Saxena 2008), le taux de mortalité augmente par manque d'accès à l'eau, le sol ayant été asséché par les cajanus lors des deux premières années et l'exploration racinaire étant bloquée à 2 m de profondeur. Les cajanus ne peuvent plus compter, pour leur alimentation hydrique que sur les précipitations alors que leurs surfaces foliaires sont maximales.

Ces résultats suggèrent que les mini-forêts peuvent être une solution partielle aux problèmes en ressource de bois énergie dans la région. Ce sont des arguments en plus à avancer aux producteurs pour favoriser cette technique agroécologique en raison de sa croissance rapide et son taux de survie plus importante comparée aux grands arbustes dont les essais de mise en place ont échoué.



Bien que les données disponibles ne permettent pas de quantifier précisément les besoins en bois de chauffe couverts par ces récoltes, des études antérieures ont montré que les tiges et troncs de cajanus, après 3 ans de croissance, peuvent fournir une quantité de bois équivalente à environ 32 jours de consommation en bois de chauffe pour les populations concernées dans un bloc dynamique comme le BAE Karoke Mahandrorano (Lhériteau et al. 2020). A ce jour, il n'existe pas d'études quantifiant précisément les besoins en bois énergie des ménages de la région.

10. Perspectives d'étude

Suite aux résultats et les différents échanges avec les producteurs et les acteurs, plusieurs axes d'étude ont été identifiés pour approfondir la compréhension des interactions entre le cajanus et les systèmes agricoles et répondre aux besoins des populations.

- **Protection et étude des ravageurs de cultures du cajanus** : Intensifier les recherches sur les méthodes de lutte contre les ravageurs du cajanus déjà répertoriés. Identifier et comprendre les menaces qui pèsent sur les systèmes actuels afin de proposer des solutions durables pour protéger les cajanus et les cultures associées.
- **Rendements des cultures associées aux cajanus** : Evaluer et comparer les rendements entre les cultures associées et les monocultures afin de quantifier l'impact direct de ces techniques agroécologiques pour les producteurs. Evaluer également le rendement des cultures après les deux ans de mini-forêts.
- **Apports nutritionnels du *Cajanus cajan*** : Évaluer les apports nutritionnels des graines de cajanus en fonction des différentes variétés, ce qui pourrait avoir des répercussions importantes pour la sécurité alimentaire dans la zone.
- **Cartographie des zones** en fonction de la profondeur de l'horizon rocheux ou via des images drones de la couverture végétale au cours de l'année. Identifier les zones favorables pour l'installation d'espèces ligneuses pour subvenir aux besoins en bois énergie et construction.
- **Plantations d'espèces ligneuses** : Tester différentes espèces à croissance rapide pouvant s'adapter aux conditions édapho-climatiques de la région, afin de combler les besoins domestiques et de maximiser les bénéfices écologiques et économiques.
- **Etude sur la consommation en bois énergie par les ménages au cours de l'année dans la région Sud**
- **Appui technique pour les producteurs** : Fournir les producteurs en semences pour les arbres fruitiers et prodiguer des conseils techniques pour l'entretien des vergers (comme dans le cas du cocotier), où les producteurs manquent de connaissances.
- **Etude diachronique** : Suivi temporel des mêmes parcelles (cajanus en bande, mini-forêts, monocultures et témoins dégradés) pour mieux comprendre et quantifier les flux de C et N et la dynamique de la macrofaune au sein des systèmes.
- **Mise en place de chantier pilote dans les nouvelles zones d'extension du cajanus** (problématique ravageur, fixation symbiotique, accès à l'eau, etc.)

11. Conclusion générale de l'étude

Cette étude démontre l'impact significatif de l'association des *Cajanus cajan* au sein de BAE sur divers aspects de la fertilité et de la biodiversité du sol. Les mini-forêts, particulièrement celles de 1 an, se distinguent par leur capacité à créer des environnements propices à une biodiversité élevée de la macrofaune du sol permettant une forte activité biologique, tout en améliorant la disponibilité des nutriments (carbone, azote, phosphore et potassium) du sol. Ces aspects sont essentiels pour renforcer la résilience des systèmes agricoles du Sud face aux conditions climatiques extrêmes, comme la sécheresse et l'absence d'apport de fertilisant organique et/ou inorganique.

En termes de gestion, les parcelles témoins dégradées/abandonnées montrent des niveaux plus faibles de fertilité et de biodiversité de la macrofaune du sol, ce qui souligne les risques de dégradation des sols en l'absence de pratiques agroécologiques comme l'installation de mini-forêts. D'ailleurs, une restauration de la fertilité des sols commence à être observée au bout de 2 ans démontrant l'importance de favoriser les techniques de jachères améliorées (mini-forêt) comparées aux jachères traditionnelles.

En outre, la capacité du cajanus à fixer l'azote atmosphérique contribue à la durabilité des systèmes. Les résultats ont montré qu'il y avait un transfert de cet azote fixé vers les cultures associées jusqu'à une distance d'au moins 5 m. Les espacements actuellement préconisés par le CTAS paraissent adéquats pour que les cultures associées bénéficient de la présence du cajanus (notamment en azote).

Cependant, la croissance du cajanus est modérée par des contraintes physiques telles que la présence d'un horizon rocheux limitant leur développement racinaire en profondeur. Cette information s'avère également importante pour les stratégies futures de diversification des espèces ligneuse et de gestion des systèmes de cultures dans cette région. Elle permet également de mieux comprendre les problèmes rencontrés pour l'implantation d'arbres dans la région en raison de la difficulté d'accéder aux nappes phréatiques.

En conclusion l'étude montre que les techniques agroécologiques à base de cajanus, comme les mini-forêts ou en cultures associées, améliorent la durabilité des parcelles en comparaison aux parcelles témoins. La capacité de ces systèmes à enrichir le sol en nutriments, notamment en azote, et à soutenir une biodiversité élevée en macrofaune doit pouvoir contribuer à leur durabilité.

12. Bibliographie

- Binkley, D., Son, Y. & Valentine, D. (2000). Do Forests Receive Occult Inputs of Nitrogen? *Ecosystems* 3, 321-331
- Bordron, B, A Germon, J Laclau, I R Oliveira, A Robin, and C Jourdan. 2021. “Nutrient Supply Modulates Species Interactions Belowground : Dynamics and Traits of Fine Roots in Mixed Plantations of Eucalyptus and Acacia Mangium,” 559–77.
- Bouillet, J. P., J. P. Laclau, J. L.M. Gonçalves, M. Z. Moreira, P. C.O. Trivelin, C. Jourdan, E. V. Silva, M. C. Piccolo, S. M. Tsai, and A. Galiana. 2008. “Mixed-Species Plantations of Acacia Mangium and Eucalyptus Grandis in Brazil. 2: Nitrogen Accumulation in the Stands and Biological N₂ Fixation.” *Forest Ecology and Management* 255 (12): 3918–30. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.10.050>.
- CIRAD, and MVAD. 2006. “Analyses Agronomiques,” 302.
- Lhérieau, Fabrice, Dominique Violas, Tolotra H. Ranaivoharimanana, Rindra R. Sandratriniaina, Rakotondramanana, Jérémie Maharetse, Tahina Raharison, Alain Brauman, and Julia Denier. 2020. “Stratégie de Développement de l’agroécologie Dans Le Grand Sud Malgache. Retour d’expériences Autour Des Blocs Agroécologiques.”
- Paula, Ranieri Ribeiro, Jean Pierre Bouillet, Paulo César Ocheuze Trivelin, Bernd Zeller, José Leonardo de Moraes Gonçalves, Yann Nouvellon, Jean Marc Bouvet, Claude Plassard, and Jean Paul Laclau. 2015. “Evidence of Short-Term Belowground Transfer of Nitrogen from Acacia Mangium to Eucalyptus Grandis Trees in a Tropical Planted Forest.” *Soil Biology and Biochemistry* 91: 99–108. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2015.08.017>.
- Saxena, K. B. 2008. “Genetic Improvement of Pigeon Pea — A Review.” *Tropical Plant Biology* 1 (2): 159–78. <https://doi.org/10.1007/s12042-008-9014-1>.
- Snoeck, Didier, Federico Zapata, and Anne-marie Domenach. 2000. “Isotopic Evidence of the Transfer of Nitrogen Fixed by Legumes to Coffee Trees” 4 (2): 95–100.
- Violas, Dominique, Jérémie Maharetse, Rindra R Sandratriniaina, and Fabrice Lhérieau. 2018. “Document de Capitalisation Sur l’expérience Des Blocs Agroécologiques.”