



Valorisation agronomique de biochars d'origine diverse sur les paramètres de croissance d'*Afzelia africana* et de *Pterocarpus erinaceus* à Faranah, Guinée

Boubacar Laïla Diallo^{a,b}, Hamidou Bah^{c*}, Adoté Hervé Gildas Akueson^c, et Sara Bailo Diallo^{a,d}

^a École doctorale en Agriculture Durable et Gestion des Ressources en Eau, Institut Supérieur Agronomique et Vétérinaire Valéry Giscard d'Estaing de Faranah (ISAV-VGE)/F, BP :131, FARANAH, République de Guinée.

^b Département Eaux et Forêts Environnement, Institut Supérieur Agronomique et Vétérinaire Valéry Giscard d'Estaing de Faranah (ISAV-VGE)/F, BP :131, FARANAH, République de Guinée.

^c Département Agriculture, Institut Supérieur Agronomique et Vétérinaire Valéry Giscard d'Estaing de Faranah (ISAV-VGE)/F, BP :131, FARANAH, République de Guinée.

^d Centre de Recherche et de Gestion du Système National de Recherche Agronomique, Zootechnique et Halieutique (CRG-SNRAH), Immeuble DIAKHABY INDUSTRIES SANGOYAH-T4, B.P : 561 Conakry, République de Guinée

*Auteur de correspondance : hamidoubah@isav.edu.gn

Submitted 21/08/2025, Published online on 31/10/2025 in the <https://www.m.elewa.org/Journals/journal-of-applied-biosciences> <https://doi.org/10.35759/JABs.213.8>

RESUME

Objectif : Cette étude a pour objectif d'évaluer l'effet de différents types de biochars sur les paramètres de croissance de deux espèces ligneuses : *Afzelia africana*, communément appelée Afzélia d'Afrique, Acajou d'Afrique, Doussié, Lingué ou Bois de fer et *Pterocarpus erinaceus*, connue sous les noms de Vène, Bois de rose d'Afrique, Kino ou Acajou du Sahel..

Méthodologie et Résultats : L'expérimentation s'est déroulée sur une période de deux années consécutives, de 2023 à 2024. Elle a été conduite sur un dispositif en split-plot avec deux espèces ligneuses (*Afzelia africana*, *Pterocarpus erinaceus*) comme facteur principal et six types de biochars (BAB, BCM, BDM, BCA, BP, BMB) plus un témoin (B0) comme facteur secondaire. On a effectué une ANOVA à un seuil de 5 %, suivie du test de StudentNewman-Keuls. Le taux de germination d'*Afzelia africana* (83–96 %) est resté supérieur à celui de *Pterocarpus erinaceus* (57–87 %) sur deux années.

Conclusion et application des résultats : Le biochar issu du chaume de maïs (BCM) a montré les meilleures performances parmi tous les traitements, avec un taux de germination maximal de 90 %. L'analyse de variance indique des différences hautement significatives ($p < 0,05$), tandis que l'effet des années d'expérimentation s'est révélé hautement significatif ($p < 0,01$), traduisant l'influence du type de biochar. L'usage du BCM est ainsi recommandé pour améliorer la croissance de *Afzelia africana* et *Pterocarpus erinaceus* dans les programmes de reboisement, avec des essais à grande échelle suggérés pour confirmer ces résultats.

Mots-clés : Biochar, Germination, *Afzelia africana*, *Pterocarpus erinaceus*, Paramètres de croissance.

Improving growth of *Azelia africana* and *Pterocarpus erinaceus* in Faranah, Guinea using different types of biochar

ABSTRACT

Objectives : This study aims to evaluate the effect of different types of biochar on the growth parameters of two woody species: *Azelia africana* and commonly called African Azelia, African Mahogany, Doussié, Lingue or Ironwood and *Pterocarpus erinaceus* known as Vene, African Rosewood, Kino or Sahel Mahogany over a two-year experimental period.

Methodology and Results : The trial was conducted in a split-plot design, with seeds of woody species as the main factor (*Azelia africana* and *Pterocarpus erinaceus*), and six type of biochar (BAB, BCM, BDM, BCA, BP, BMB, and Bo as a control without biochar, as the secondary factor. Analysis of variance (ANOVA) was performed at a 5% significance level, followed by a mean comparison test (Student-Newman-Keuls test). The results showed that *Azelia africana* had a higher germination rate of 83 à 96 %, compared to *Pterocarpus erinaceus* (57 à 87%) within two year.

Conclusions and application of findings: The BCM treatment induced better performance compared to the other treatments with a maximum germination rate of 90%. ANOVA indicates highly significant differences ($p < 0.05$), while the effect of the years of experimentation was found to be highly significant ($p < 0.01$), reflecting the influence of the type of biochar. The use of BCM is recommended to optimize the initial growth of forest species in reforestation programs. It is suggested that these trials be extended to large-scale field conditions to validate the results under farmer-managed settings.

Keywords : Biochar, Germination, *Azelia africana*, *Pterocarpus erinaceus*, growth Parameters

INTRODUCTION

La déforestation, la dégradation des sols et la faible régénération naturelle des essences forestières menacées constituent des défis majeurs pour la restauration des écosystèmes en Afrique de l'Ouest (FAO, 2023). En particulier, *Azelia africana* et *Pterocarpus erinaceus* font l'objet d'une forte exploitation pour leur bois de valeur, sans qu'aucun effort significatif de reboisement durable ne soit mis en œuvre à grande échelle (Ouédraogo *et al.*, 2022). Parallèlement, la faible fertilité des sols et les stress abiotiques (sécheresse, températures élevées) compromettent le succès de la germination et la croissance des jeunes plants dans les milieux naturels (Tondoh *et al.*, 2021). Dans ce contexte, le recours au biochar, un amendement organique produit par pyrolyse de biomasse, suscite un intérêt croissant en raison de ses effets bénéfiques sur la structure du sol, la rétention d'eau et la disponibilité des nutriments (Lehmann & Joseph, 2022). Toutefois, les effets du biochar

varient selon le type de biomasse utilisé, l'espèce végétale ciblée et les conditions pédoclimatiques locales (Abujabhah *et al.*, 2022). Peu d'études se sont intéressées à l'impact comparatif de différents types de biochar sur des espèces forestières prioritaires dans les conditions ouest-africaines. Plusieurs recherches récentes ont montré que l'amendement du sol avec du biochar peut améliorer significativement la germination, la croissance et la productivité des plantes, y compris des espèces forestières (Agegnehu *et al.*, 2021 ; Ajayi *et al.*, 2023). Le biochar agit notamment en améliorant la capacité de rétention d'eau, la porosité du sol, et la disponibilité des éléments nutritifs essentiels (Lehmann & Joseph, 2022). Dans un contexte où la restauration des écosystèmes forestiers passe par la promotion de reboisements efficaces, identifier les types de biochar les plus performants pour les espèces ligneuses comme *Azelia africana* et *Pterocarpus*

erinaceus représente une étape cruciale (Akoto-Danso *et al.*,2022). Cette étude s'inscrit donc dans une perspective d'optimisation des pratiques sylvicoles et de valorisation des déchets d'origine diverses pour renforcer la résilience des systèmes

agroforestiers ouest-africains (Tondoh *et al.*,2021 ; Abujabhah *et al.*,2022). Les résultats obtenus contribueront à orienter les politiques de reboisement durable, en intégrant les techniques d'amendement organique adaptées aux contraintes locales.

MATERIEL ET METHODES

Zone d'étude : L'essai a été conduit dans la station expérimentale du Département des Eaux et Forêts Environnement de l'Institut Supérieur Agronomique et Vétérinaire (ISAV) de Faranah, située dans la Commune Urbaine, République de Guinée. Le climat est de nature

soudano-guinéenne, avec une moyenne annuelle de précipitations d'environ 1 200 mm. Il présente une saison pluvieuse allant de mai à octobre et une saison aride influencée par l'harmattan. Le sol du site est majoritairement ferrallitique, peu profond et légèrement acide.

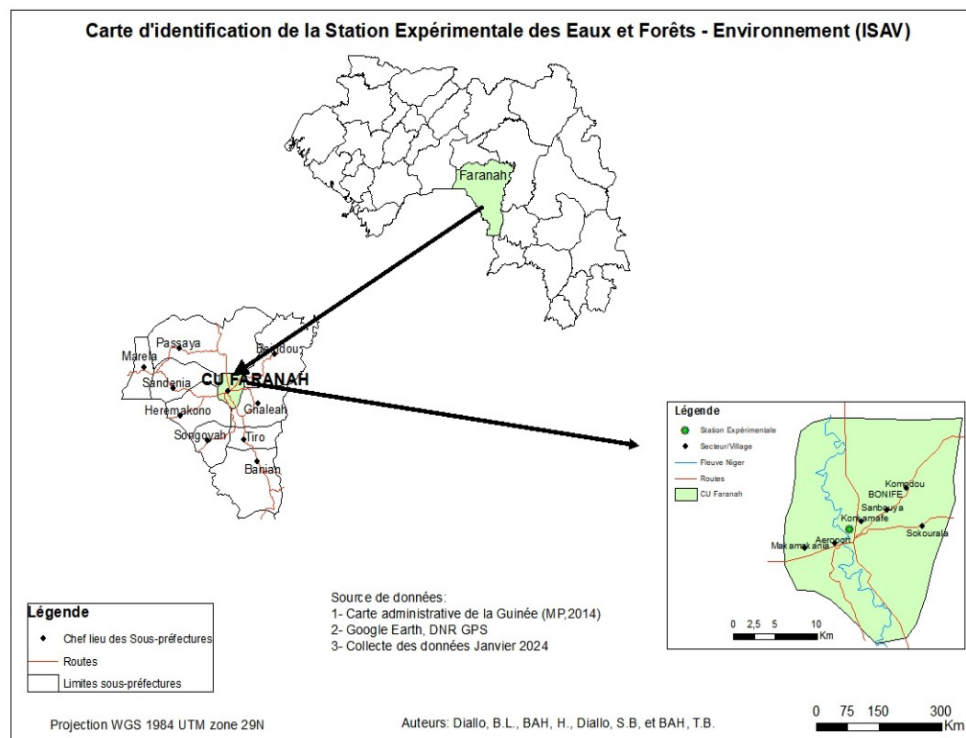


Figure 1 : Carte du milieu d'étude

Production des biochars :Le système de production du biochar est conditionné par la production de la chaleur indirecte obtenue à base d'un carbonisateur à deux chambres, composé de fûts dont une chambre externe (fût principal) où se produit la combustion (zone chaude) et une chambre interne (plus petit fût) contenant la biomasse à carboniser. Ce procédé permet une pyrolyse contrôlée (en absence

d'oxygène), en séparant la combustion (extérieur) et la carbonisation (intérieur), évitant la combustion directe de la matière à transformer en biochar. Le système de carbonisation est constitué de deux fûts : un fût externe de 200 litres et un petit fût (chambre de combustion), le feu entour le fût interne. Un fût de 100 litres de capacité complètement hermétique (chambre de carbonisation). Le fût

externe est troué à la base pour faciliter la rentrée de l'air, il existe des béquilles pour surélever le petit fût (interne), il existe aussi des béquilles pour surélever le fût externe. Enfin, il existe une cheminée qui facilite l'aspiration de l'air vers la partie supérieure du système de carbonisation. Les étapes de production du biochar ont été : (1) chargement de la biomasse (la biomasse (abats, paille, chaume de maïs, coques d'arachide...) est placée à tour de rôle dans le fût interne, qui est ensuite scellé, parfois avec quelques petits trous pour laisser sortir les gaz de pyrolyse etc.), (2) montage du système (le fût interne est placé au centre du fût externe, avec un espace d'environ 10–15 cm tout autour. L'espace entre les deux fûts est rempli de combustible solide comme de petits bois, feuilles sèches, etc.), (3) allumage (Le feu est allumé par le haut ou par le bas de la chambre externe, il chauffe la chambre interne, provoquant la pyrolyse de la biomasse à l'intérieur, sans oxygène), (4) Carbonisation (la température atteint entre 400 et 600 °C, provoquant la décomposition thermique de la matière organique et les gaz de pyrolyse s'échappent par les événements du fût interne, pouvant eux-mêmes s'enflammer (pyrogazéification partielle), (5) Extinction et refroidissement (à la fin de la combustion (absence de flamme), le système est fermé hermétiquement pour refroidir à l'abri de l'air puis le refroidissement dure 12 à 24 heures selon la nature de biomasse pour éviter l'oxydation du biochar encore chaud.), (6) Récupération du biochar (le fût interne est ouvert et le biochar est récupéré).

Empotage : Pour l'empotage un terreau forestier a été collecté dans la forêt de Karamoko- Kourouma, du sable fin a été collecté, tous ces matériels ont été transporté à l'ancien atelier de Génie Rural ; qui a servi d'air de travail. Un mélange du substrat a été minutieusement effectué avec chaque type de biochar dans des pots de 1Kg de capacité de charge avec 650 g de terreau, 300 g de sable et 50 g de biochar.

Semis des graines : Deux semis ont été effectué en deux ans le premier semis a été effectué 05 juillet 2023 et le second semis a été effectué le 05 juillet 2024, une graine par espèce (d'*Afzelia africana* et de *Pterocarpus erinaceus*) a été semé dans chaque pot. Pour les graines d'*Afzelia africana*, la graine a été semée à 3cm de profondeur, et elle a été placée horizontalement avec un léger arrosage. Un ombrage léger a été construit pour l'essai et un arrosage régulier a été effectué pour une durée de trois semaines avec une fréquence d'un arrosage par jour. Pour la semence de *Pterocarpus erinaceus*, elle a été placée à une profondeur de 2cm, avec un léger recouvrement suivi de l'arrosage. Un ombrage léger a été construit et un arrosage régulier pour les trois premières semaines, avec une fréquence d'un arrosage par jour pendant la saison pluvieuse puis de façon continue, un arrosage irrégulier a été effectué en saison pluvieuse et un arrosage régulier en saison sèche.

Dispositif expérimental : Un dispositif en split-plot a été mis en place avec deux facteurs (les espèces ligneuses et les types de biochars). L'essai a été conduit en pépinière avec quatorze traitements. Chaque traitement a connu trois répétitions soit un total de 42 parcelles élémentaires. Le facteur principal est représenté par les semences des deux espèces ligneuses (*Afzelia africana* et *Pterocarpus erinaceus*) et le facteur secondaire par les six types de biochars : (1) biochar à base des abats (BAB), (2) biochar à base de coques d'arachide (BCA), (3) biochar à base de chaumes de maïs (BCM), (4) biochar à base de pailles (BP), biochar à base de déchets ménagers (BDM), biochar à base de morceaux de bois (BMB).

Méthodes de caractérisation des biochars : Les paramètres de biochars ont été caractérisé par les méthodes suivantes : le pH (mesuré dans une suspension biochar/eau à 1, 2, 5), les teneurs en carbone et azote totaux (par analyse élémentaire CHNS), le phosphore assimilable

(méthode Bray I), les actions échangeables (K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+) par spectrométrie d'absorption atomique, et la capacité d'échange cationique (CEC) par calcul à l'aide de formules. Ces analyses ont permis d'évaluer le potentiel fertilisant de chaque type de biochar appliqué.

RESULTATS

Caractéristiques agrochimiques des biochars : Les six types de biochars se distinguent par leurs caractéristiques agrochimiques, susceptibles d'influencer la croissance des espèces ligneuses en pépinière. Leur pH varie de 7,2 (BCM), 8,3 (BMB) à 9,1 (BDM). Un pH plus élevé (alcalin) peut faciliter l'absorption de certains nutriments. Par exemple, le biochar de déchets ménagers (BDM), avec un pH de 9,1, peut être bénéfique pour les plantes tolérantes aux conditions alcalines, comme certaines espèces tropicales. Les biochars sont particulièrement riches en carbone, notamment en BCA (39,43 % C), en BDM (40,48 % C), et en BMB (49,78 % C) augmentant ainsi la teneur en matière

Analyse statistique : L'analyse de variance (ANOVA) a été utilisée à un seuil de signification de 5 %, suivie d'un test de comparaison de moyennes (test de Student-Newman-Keuls).

organique du substrat, cela montre aussi le sol représente un bon client de séquestration pour la séquestration de carbone. Cette abondance peut favoriser la rétention d'humidité et la stabilité du sol, ce qui est favorable à la germination des graines et à la phase initiale de croissance des plantes. La conductivité électrique (CE) varie de 0,53 (BP), à 52,4 (BAB), à 65,7 (BCA), reflétant la salinité potentielle du substrat. Des niveaux élevés de CE, comme ceux du BCA, peuvent parfois limiter la croissance si les plantes sont sensibles aux sels. Cependant, dans ce cas, il semble favoriser certaines mesures de croissance pour *Azelaia africana* (Tableau 1).

Tableau 1 : Caractérisation des biochar

Paramètres	Sol	Biochars					
		BAB	BMB	BP	BCA	BCM	BDM
pH (eau)	6,1	6,9	8,3	7,4	7,6	7,2	9,1
Conductivité électrique (EC, $\mu S/cm$)	8,36	52,4	1,16	0,53	65,7	1,97	33,3
Carbone (C, %)	2,1	9,37	49,78	39,43	11,03	40,17	40,48
Azote total (%)	0,15	1,32	0,62	0,34	0,76	0,42	0,67
C/N (%)	14	7,12	80,82	117,35	14,60	95,65	60,24
Matière organique (%)	3,6	16,12	85,63	67,82	18,98	69,10	69,63
Phosphore assimilable (ppm)	55	92,57	6,04	1,17	1,09	5,96	4,29
Calcium Ca^{2+} (cmol.kg ⁻¹)	0,769	na	na	nd	nd	nd	nd
Magnésium Mg^{2+} (cmol.kg ⁻¹)	0,706	na	na	nd	nd	nd	nd
Potassium K^+ (cmol.kg ⁻¹)	0,09	na	na	nd	nd	nd	nd
Na^+ (cmol.kg ⁻¹)	0,067	na	na	nd	nd	nd	nd
CEC (cmol.kg ⁻¹)	3,16	na	na	nd	nd	nd	nd
Ca (ppm)	nd	20,875	3,531	1,278	0,688	0,671	4,938
Mg (ppm)	nd	0,227	0,119	0,311	0,239	0,390	0,181

K (ppm)	nd	0,495	1,430	0,774	1,260	1,192	3,480
Fe (ppm)	15,26	0,285	0,239	1,458	2,464	1,088	2,425
Mn (ppm)	43,14	0,345	0,594	4,237	4,817	3,591	4,151
Cu (ppm)	206	4,161	6,761	44,361	44,761	37,161	42,561
Zn (ppm)	2,18	0,154	0,146	0,137	0,137	0,082	0,161

Légende :

pH : potentiel hydrogène, C/N : Rapport carbone azote ; CEC : Capacité d'échange cationique ; BAB : Biochar à base des abats, BP : Biochar à base de pailles, BCA : Biochar à base de coques d'arachides, BCM : Biochar à base de chaume de maïs, BMB : Biochar à base des morceaux de bois, BDM : Biochar à base de déchets ménagers, nd : non déterminé.

Influence des biochars sur le taux de germination (TG) de *Azelia africana* et de *Pterocarpus erinaceus* pour les deux années : La Figure 2 montre qu'au seuil de 5%, le test ANOVA a révélé des coefficients strictement significatifs ($p < 5\%$). L'étude comparative des différents traitements biochar révèle que le biochar à base de chaume de maïs (BCM) se distingue nettement comme le traitement le plus performant. Il présente le taux de germination le plus élevé (90%), une vitesse germinative rapide, ainsi qu'une efficacité germinative supérieure, tout en assurant une bonne stabilité des résultats, ce qui en fait un choix optimal pour stimuler la levée des semis. Le biochar à base de coques

d'arachide (BCA) et celui à base de morceaux de bois (BMB) affichent également de bons résultats, notamment en matière de biomasse et de croissance, bien que leur variabilité soit plus marquée. À l'opposé, le traitement BP (paille) et le témoin B0 se montrent peu efficaces, avec des performances inférieures sur la majorité des indicateurs. Ces résultats suggèrent que le type de matière première utilisée pour la fabrication du biochar influence fortement ses effets agronomiques, et que le BCM constitue une solution prometteuse pour améliorer la germination et la croissance des plantes dans un contexte de production durable. Le Figure 2 présente la boîte à moustache des types de traitement sur le taux de germination.

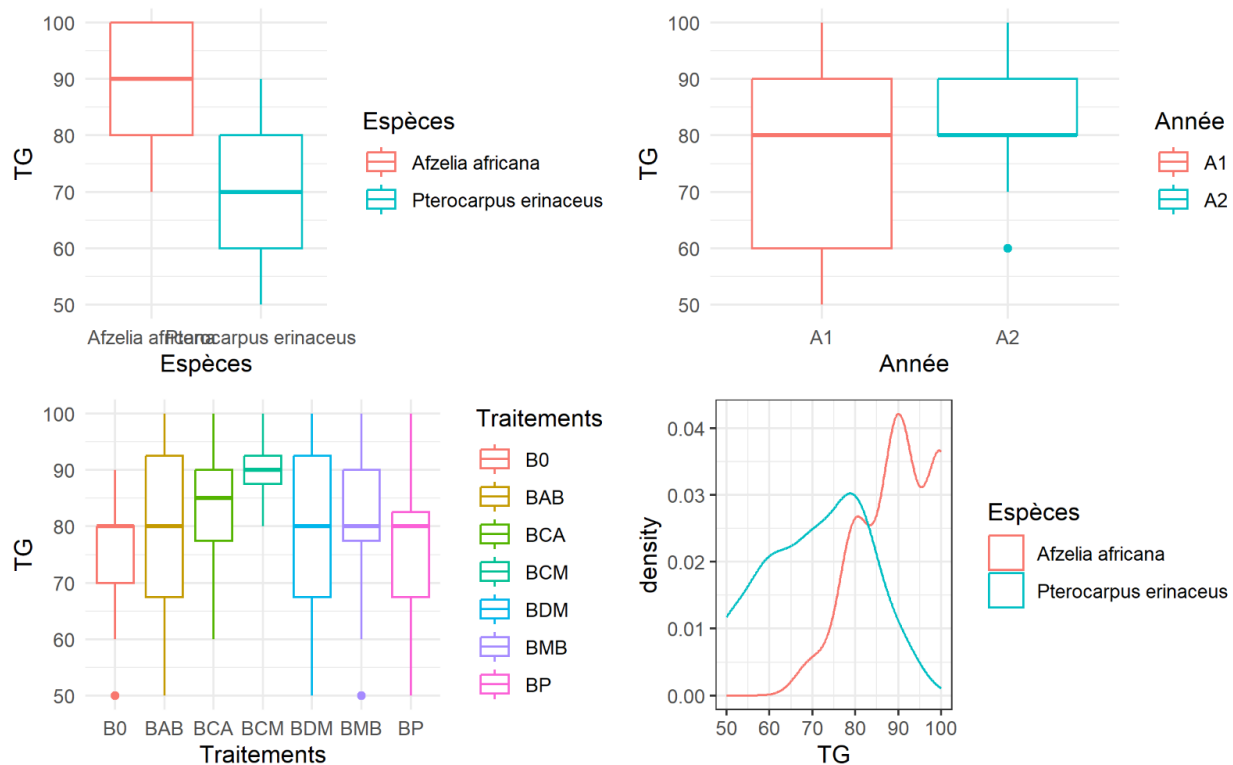


Figure 2 : Boxplot des taux de germination et des densités

L'analyse des p value a montré que l'espèce, les années d'expérimentation et le type de traitement influencent significativement le

taux de germination à 95% de confiance (Tableau 2).

Tableau 2 : Effet des biochars sur le taux de germination des deux espèces ligneuses sur les deux années

Paramètres	Somme des carrés	ddl	Carrés moyens	F	p
Espèces	7810,7	1	7810,71	99,33	0,001 ***
Année	1001,2	1	1001,19	12,73	0,001 ***
Traitements	1881	6	313,49	3,987	0,002 **
Répétitions	350	2	175	2,225	0,117
Espèces * Répétitions	564,3	2	282,14	3,588	0,034 *
Année * Répétitions	16,7	2	8,33	0,106	0,9
Traitements * Répétitions	783,3	12	65,28	0,83	0,619
Résidus	4482,1	57	78,63		

Niveaux de signification : *p < 0,05 ; **p < 0,01 ; ***p < 0,001.

Dans le tableau 2, le test de structuration de Tukey, à 5%, a permis d'analyser les différences observées. D'abord, il est

important de noter que l'espèce *Afzelia africana* présente un taux de germination significativement supérieur à celui de

Pterocarpus erinaceus, avec une différence de +19,3 %. Cela suggère que *Azelia africana* a une meilleure aptitude à germer, indépendamment du traitement appliqué. (+19,3%) [p.value < 0,05]. Pour ce qui est du traitement l'analyse réalisée à l'aide du test de Tukey au seuil de 5 % a permis de comparer les effets des différents traitements à base de biochar sur le taux de germination des semences étudiées. Parmi l'ensemble des comparaisons, c'est le traitement BCM qui s'est distingué par son efficacité. En effet, le taux de germination obtenu avec ce traitement est significativement supérieur à celui du témoin (B0), avec une différence moyenne de 15 points et une valeur de $p = 0,002$. De plus, le traitement BCM s'est également révélé significativement plus performant que le

traitement BDM et le traitement BP, avec des différences respectives de 11,667 ($p = 0,032$) et 14,167 ($p = 0,004$). Bien que la comparaison entre BCM et BAB ait donné un résultat proche de la significativité ($p = 0,059$), elle ne peut être statistiquement confirmée à ce seuil. En revanche, les autres traitements BAB, BCA, BDM, BMB et BP n'ont pas montré de différences significatives entre eux ni vis-à-vis du témoin, ce qui laisse supposer qu'ils n'ont pas eu d'effet marquant sur le taux de germination. Globalement, cette analyse met en évidence que le BCM est le seul traitement ayant induit une amélioration significative du taux de germination, positionnant ce matériau comme le plus prometteur parmi ceux testés dans le cadre de cette étude.

Tableau 3 : Test de structuration de Tuckey

Traitements		Traitements	Différence moyenne	Erreur standard	ddl	t	P _{Tukey}
B0	-	BAB	4,167	3,62	57	-1,151	0,909
	-	BCA	8,333	3,62	57	-2,302	0,261
	-	BCM	15	3,62	57	-4,143	0,002 **
	-	BDM	3,333	3,62	57	-0,921	0,968
	-	BMB	5,833	3,62	57	-1,611	0,676
	-	BP	0,833	3,62	57	-0,23	1
BAB	-	BCA	4,167	3,62	57	-1,151	0,909
	-	BCM	10,833	3,62	57	-2,992	0,059
	-	BDM	-0,833	3,62	57	0,23	1
	-	BMB	1,667	3,62	57	-0,46	0,999
	-	BP	-3,333	3,62	57	0,921	0,968
BCA	-	BCM	6,667	3,62	57	-1,842	0,526
	-	BDM	-5	3,62	57	1,381	0,809
	-	BMB	-2,5	3,62	57	0,691	0,993
	-	BP	-7,5	3,62	57	2,072	0,383
BCM	-	BDM	-11,667	3,62	57	3,223	0,032 *
	-	BMB	-9,167	3,62	57	2,532	0,167
	-	BP	-14,167	3,62	57	3,913	0,004 **
BDM	-	BMB	2,5	3,62	57	-0,691	0,993
	-	BP	-2,5	3,62	57	0,691	0,993
BMB	-	BP	-5	3,62	57	1,381	0,809

Niveaux de signification : * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$.

Influence des biochars sur l'indice de récolte et la production de biomasse d'*Afzelia africana* et de *Pterocarpus erinaceus* pour les deux années : Le Tableau 3 indique que l'analyse statistique des données relatives à l'indice de récolte et la production de biomasse des deux espèces (*Afzelia africana* et *Pterocarpus erinaceus*) sur deux années a révélé des effets significatifs de plusieurs facteurs. Concernant l'indice de récolte, l'ANOVA a montré un effet très hautement significatif de l'espèce ($F = 80,80$; $p = 0,001^{***}$), indiquant que les différences observées entre les deux espèces sont statistiquement valides. L'année de culture a également un effet significatif ($F = 10,36$; $p = 0,002^{**}$), ce qui suggère que les conditions annuelles influencent notablement cet indicateur. L'interaction entre l'espèce et l'année est proche du seuil de significativité ($F = 3,56$; $p = 0,063$), laissant penser à une tendance d'interaction entre ces deux facteurs sans qu'elle soit confirmée statistiquement au

seuil de 5 %. En ce qui concerne le rendement, l'effet de l'espèce est aussi hautement significatif ($F = 7811$; $p = 0,001^{***}$), tandis que l'année et l'interaction ne semblent pas introduire de variation notable. D'un point de vue biologique, *Afzelia africana* se distingue nettement par un indice de récolte plus élevé que *Pterocarpus erinaceus*, avec une moyenne de 19 % ($\pm 2,0$) en année 1 contre 4 % ($\pm 0,67$) pour la seconde espèce. Cette différence suggère une meilleure capacité d'*Afzelia africana* à convertir sa biomasse en production utile (graines ou fruits). Quant au rendement, bien que les deux espèces présentent des valeurs proches entre les années (89 à 91 pour *Afzelia africana* ; 65 à 76 pour *Pterocarpus erinaceus*), les effets observés ne semblent pas liés à l'année, mais principalement à l'espèce. En résumé, ces résultats mettent en évidence l'importance du facteur espèce dans la variabilité de la production, avec une performance supérieure d'*Afzelia africana*, notamment en termes d'indice de récolte.

Tableau 4 : Test ANOVA Espèces x Années de culture

Espèces	Afzelia africana		Pterocarpus erinaceus	
Années	Année 1	Année 2	Année 1	Année 2
Indice de récolte	19 ($\pm 2,0$)	14 ($\pm 1,3$)	4,0 ($\pm 0,67$)	3,0 ($\pm 0,68$)
Production de biomasse	89 (± 10)	91 ($\pm 7,3$)	65 (± 13)	76 ($\pm 8,0$)
Signif level	***		***	
				p
Espèces	7811	7810,7	80,80	0,001 ***
Année	1001	1001,2	10,36	0,002 **
Espèces * Année	344	344,0	3,56	0,063

Niveaux de signification : * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$.

Classification des paramètres morphologiques : La classification réalisée a permis de ressortir quatre groupes distincts de paramètres morphologiques.

Groupe 1 : Ce groupe, exclusivement constitué de *Pterocarpus erinaceus*, affiche globalement les valeurs les plus faibles sur la majorité des variables mesurées. Les performances sont particulièrement modestes pour les paramètres de croissance comme la hauteur finale ($H_f = 10.6$ cm), le diamètre final

($D_f = 3.76$ mm), la surface foliaire ($SF = 56.5$ cm²), et la biomasse aérienne sèche ($BAH = 3.25$ g). De même, les indicateurs de vitesse germinative ($VG = 21.7$ %) et d'énergie germinative ($EG = 32.6\%$) sont peu élevés. Ces résultats suggèrent une croissance lente et une faible capacité de développement dans les conditions de ce groupe. Toutefois, le taux de germination ($TG = 65.2\%$) reste relativement correct, et pourrait indiquer une bonne levée

initiale, mais un développement ultérieur limité.

Groupe 2 : Composé uniquement de *Pterocarpus erinaceus*, ce groupe présente une nette amélioration par rapport au groupe 1 sur plusieurs paramètres. La vitesse germinative (VG = 25.4) et l'énergie germinative (EG = 46.7%) y sont plus élevées. En termes de croissance, on observe une meilleure hauteur finale (Hf = 25.3 cm) et une augmentation marquée de la surface foliaire (SF = 46.4 cm²). Toutefois, certaines valeurs montrent encore de la variabilité, avec un écart-type relativement élevé pour SF et BRH, suggérant une hétérogénéité dans la croissance des plants. Ce groupe montre donc un potentiel agronomique intermédiaire, avec des performances en croissance supérieures au groupe 1 mais encore en retrait par rapport aux groupes 3 et 4.

Groupe 3 : Ce groupe est constitué uniquement de *Azelia africana* et se distingue par une excellente vigueur et un développement végétatif important. On observe des valeurs moyennes supérieures pour plusieurs indicateurs clés : taux de germination (TG = 91.4%), vitesse germinative (VG = 30.5), énergie germinative

(EG = 46.7%), hauteur finale (Hf = 27.9 cm), et diamètre final (Df = 8.83 mm). La biomasse et la surface foliaire sont aussi nettement améliorées par rapport aux groupes 1 et 2. Ce groupe combine bonne levée et croissance rapide, faisant de lui un groupe performant et homogène, bien adapté pour des programmes de reboisement ou d'amélioration forestière.

Groupe 4 : Ce groupe, également composé de *Azelia africana*, montre les meilleures performances absolues sur l'ensemble des paramètres mesurés, notamment en ce qui concerne la hauteur finale (Hf = 30.2 cm), la surface foliaire (SF = 241 cm²), et les biomasses (BAH = 107 g ; BHT = 158 g ; BAS = 58.1 g). Ces valeurs très élevées sont accompagnées de bons résultats en germination (TG = 88.6%) et en vigueur (VG = 29.5), avec une variabilité relativement maîtrisée. Le seul point faible relatif pourrait être la variabilité plus marquée dans certaines variables (ex. Hf, SF), ce qui pourrait s'expliquer par des réponses différenciées aux traitements biochar. Néanmoins, ce groupe reste globalement le plus performant et le plus prometteur en termes de productivité et de développement végétatif.

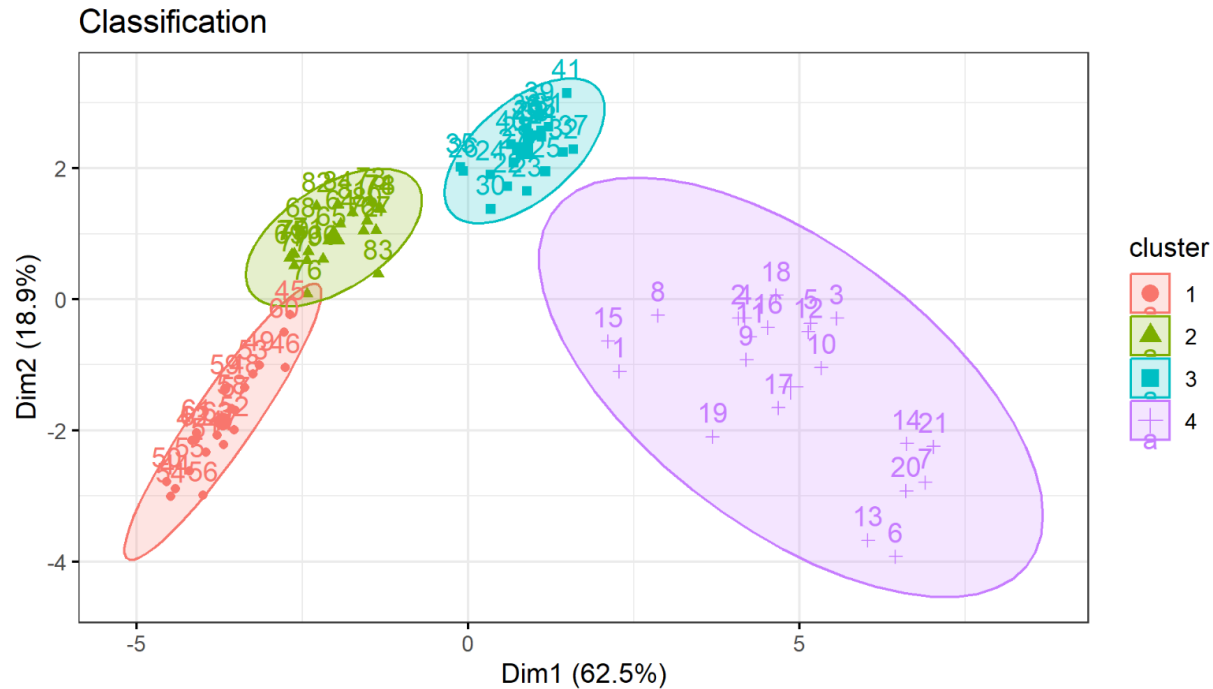


Figure 3 : Classification

Corrélation entre les paramètres étudiés :

La matrice de corrélation met en évidence plusieurs relations significatives entre les variables de croissance, de germination et de biomasse des plants étudiés. Les résultats montrent une corrélation très forte entre les différentes formes de biomasse, tant sèche qu'humide, notamment entre la biomasse humide totale (BHT) et la biomasse aérienne sèche (BAS) avec un coefficient de corrélation de $r = 0,98$, et entre la biomasse racinaire sèche (BRS) et la biomasse racinaire humide (BRH) ($r = 0,97$). Ces relations traduisent une cohérence dans la répartition et le développement des masses végétales. De plus, la surface foliaire (SF) est fortement liée à la biomasse aérienne (BAH, $r = 0,95$), suggérant

que le développement foliaire contribue fortement à la production de biomasse aérienne. Concernant la germination, des corrélations élevées sont observées entre le taux de germination (TG), la vitesse germinative (VG), la hauteur initiale (Hi) et un paramètre apparenté à la vigueur (HMP), avec des coefficients allant de $r = 0,70$ à $r = 0,78$, indiquant qu'un meilleur démarrage des semences est généralement associé à une croissance initiale plus vigoureuse. Enfin, la hauteur finale (Hf) et le diamètre final (Df) sont modérément à fortement corrélés ($r \approx 0,66$), tout comme le nombre de feuilles (NFE) et le diamètre final ($r = 0,71$), ce qui suggère que la morphologie finale des plants est étroitement liée à leur développement foliaire.

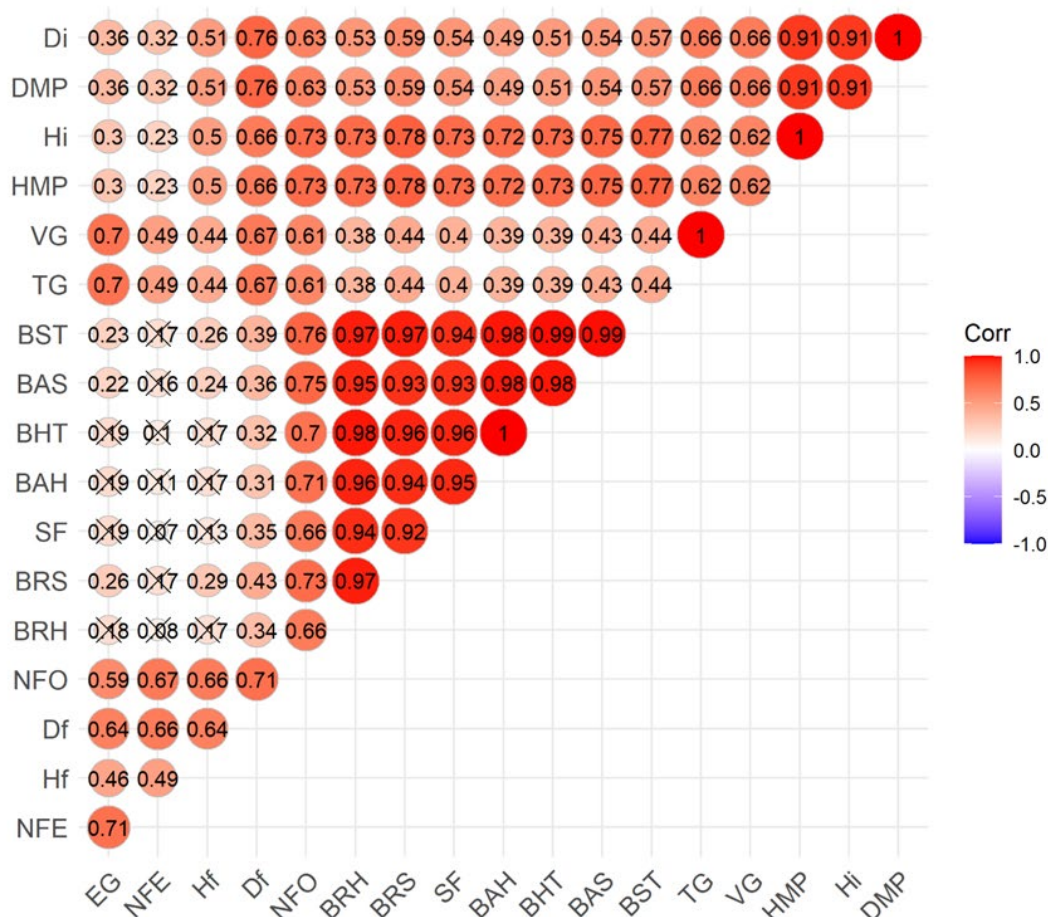


Figure 4 : Corrélation entre les différents paramètres étudiés

DISCUSSION

Les résultats de cette étude montrent une influence significative du type de biochar sur la germination et la production de biomasse de *Azelia africana* et *Pterocarpus erinaceus*, en cohérence avec les recherches antérieures sur les effets du biochar sur la productivité végétale (Lehmann & Joseph, 2022). L'utilisation du biochar à base de chaumes de maïs (BCM) s'est avérée la plus efficace, améliorant significativement le taux de germination et la production de biomasse comparativement aux autres types testés. D'après Ajayi et al. (2023), le biochar d'origine ligneuse ou agricole possède des propriétés physico-chimiques favorables à la croissance des plantes, notamment par sa capacité à améliorer la rétention d'eau, la porosité du sol et la disponibilité des éléments

nutritifs. Ceci corrobore notre résultat, où le BCM, probablement plus riche en matière organique stable et cendres minérales, a stimulé la germination. Le meilleur comportement germinatif observé chez *Azelia africana* (+19,3 % comparé à *Pterocarpus erinaceus*) confirme les observations de Akoto-Danso et al. (2022) qui soulignent une plus grande plasticité écologique de cette espèce face aux contraintes abiotiques en Afrique de l'Ouest. La variation interspécifique dans la réponse aux amendements organiques est également rapportée par Abujabhah et al. (2022), qui précisent que la réponse des plantes au biochar dépend largement de leurs exigences physiologiques et de leur capacité d'absorption des nutriments. L'année de culture a influencé

significativement les performances, ce qui rejoint les conclusions de Agegnehu *et al.* (2021) sur l'interaction entre le climat annuel et la dynamique des amendements organiques. En effet, l'efficacité du biochar est souvent modulée par les conditions climatiques comme l'humidité et la température (Tondoh *et al.*, 2021). Le fait que les biochars issus de déchets ménagers (BDM), de paille (BP) et d'autres biomasses n'aient pas produit d'effets significatifs indique une hétérogénéité dans leur composition. Ronsse *et al.* (2023) insistent sur l'importance de la qualité du biochar (teneur en carbone fixe, CEC, pH) dans ses effets agronomiques. Un biochar mal préparé ou contenant des métaux lourds ou des composés inhibiteurs peut même réduire la germination (Song *et al.*, 2023). Par ailleurs, l'impact limité des biochars autres que BCM pourrait être lié à une faible biodisponibilité des nutriments ou une mauvaise structuration du sol après application, comme noté par Chen

et al. (2022) dans leurs essais sur la croissance des espèces ligneuses. Enfin, notre recommandation de poursuivre les essais à plus grande échelle est en accord avec les conclusions de Zhang *et al.* (2024) qui recommandent de tester les amendements organiques en conditions réelles paysannes pour mieux capturer la complexité des interactions sol-plante-climat. Il est également essentiel de considérer l'effet cumulatif et à long terme du biochar sur la fertilité des sols, comme le soulignent Yeboah *et al.* (2023) dans une méta-analyse sur les impacts du biochar dans les systèmes agroforestiers africains. En somme, cette étude confirme le potentiel du biochar de chaume de maïs comme levier pour améliorer la régénération de deux espèces forestières prioritaires. Elle ouvre également des perspectives de valorisation des résidus animaux et végétaux dans les politiques de reboisement durable et de restauration des terres dégradées.

CONCLUSION ET APPLICATIONS DE RESULTATS

Les résultats obtenus montrent que l'ajout de biochar, particulièrement à la dose de 50 g, améliore significativement certains paramètres de croissance tels que la hauteur, le diamètre au collet et la production de biomasse foliaire, par rapport au témoin non amendé. Ces observations confirment le potentiel agronomique du biochar comme amendement organique dans les programmes de reboisement et de restauration écologique, notamment dans les zones dégradées ou pauvres en nutriments. En outre, l'utilisation du biochar représente une option durable et écologique pour valoriser les résidus ligneux issus des activités sylvicoles, tout en contribuant à la séquestration du carbone dans les sols. Cependant, pour une meilleure

compréhension des mécanismes en jeu, des études complémentaires seront nécessaires, notamment sur la dynamique de libération des nutriments, l'interaction du biochar avec les microorganismes du sol, et les effets à long terme sur la survie et le développement des plants en conditions de plein champ. Ces travaux devront aussi explorer les effets combinés du biochar avec d'autres types de fertilisants organiques ou minéraux, afin d'optimiser les doses et les conditions d'utilisation selon les types de sols. En somme, l'intégration raisonnée du biochar dans les systèmes de production forestière constitue une voie prometteuse pour la conservation et la valorisation durable des espèces ligneuses locales telles qu'*Azelia africana*.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abujabbar, I. S., Bound, S. A., Doyle, R., & Bowman, J. P. (2022). Effect of feedstock and pyrolysis temperature on biochar properties and plant response. *Soil Use and Management*, 38(3), 655–667.
- Agegehu, G., Srivastava, A. K., & Bird, M. I. (2021). Biochar and its role in improving soil properties and crop productivity: A review. *Agronomy*, 11(5), 944.
- Ajayi, F. O., Adebayo, B. O., & Omotayo, S. D. (2023). Biochar amendments and seedling vigor of tropical tree species. *Journal of Sustainable Forestry*, 42(1), 12–25.
- Akoto-Danso, E. K., Parthiban, K. T., Ofori, D. A., & Agyeman, V. K. (2022). Forest restoration with native trees: Species selection under changing climate in West Africa. *Trees, Forests and People*, 10, 100318.
- Chen, D., Pan, G., Li, L., Liu, Y., & Zhao, Y. (2022). Effects of biochar on soil structure and plant growth in degraded lands: A case study in dry tropics. *Journal of Arid Environments*, 197, 104673.
- Lehmann, J., & Joseph, S. (2022). *Biochar for Environmental Management: Science, Technology and Implementation* (3rd ed.). Routledge.
- Ronsse, F., Van Hecke, S., Mašek, O., & Buss, W. (2023). Qualitative assessment of biochars derived from various feedstocks. *Biomass and Bioenergy*, 173, 106643.
- Song, Y., Wang, Z., Chen, X., & Sun, H. (2023). Potential toxicity of biochar: Impacts on seed germination and microbial activity. *Environmental Pollution*, 312, 120066.
- Yeboah, E., Agyeman, V. K., Quansah, G. W., & Owusu, A. (2023). Impacts of biochar application on soil quality and crop yield in Sub-Saharan Africa: A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 343, 107185.
- Zhang, Q., Wu, H., Sohi, S. P., & Li, B. (2024). Scaling biochar application in agroforestry systems: Opportunities and constraints. *Nature Sustainability*, 7(2), 145–152.
- Tondoh, J. E., N'Dri, J. K., & Kouakou, T. H. (2021). Biochar and seasonal variation of crop performance under tropical conditions. *African Journal of Agricultural Research*, 16(2), 87–95.