


Journal of
Environment
(JE)

**Variabilité Structurale des Peuplements Forestiers en Cuvette
Centrale Congolais: Influence du Gradient Altitudinal**



CARI
Journal

Variabilité Structurale des Peuplements Forestiers en Cuvette Centrale Congolais : Influence du Gradient Altitudinal

 Evariste Loke Lobanga^{1,2*}, Roger Katusi Lomalisa¹, Janvier Lisingo wa Lisingo^{1,2}, Isaac Bosuandole Bolila³, Jadot Bondjandi Lotombo³, Damien Essala Atickwe³, Hippolyte Nshimba S.W-M.¹, Thom's Kavali Tondo^{1,2}, Jean-Bosco Ndjango Ngoni¹, Michel Mbasi Mbula⁴, Christophe Lomba Bosombo L.¹.

¹Université de Kisangani (RDC)

²Laboratoire d'Ecologie et Aménagement Forestier (RDC)

³Institut Supérieur Pédagogique d'Isangi (RDC)

⁴Institut Supérieur d'Etudes Agronomiques de Bengamisa (RDC).

<https://orcid.org/0009-0004-2027-7979>

Accepted : 31st March, 2026, Received in Revised Form : 12th April, 2026, Published : 24th April, 2026

Abstract

But de l'étude : Cette recherche vise à analyser les déterminants de la variabilité structurale des peuplements forestiers au sein de la Cuvette centrale congolaise, en évaluant spécifiquement l'influence du gradient altitudinal sur l'organisation physique des massifs et leur potentiel de stockage de carbone. L'objectif est d'identifier les configurations architecturales les plus aptes à maximiser la séquestration de biomasse dans un contexte de gestion durable.

Méthodologie : La démarche repose sur un inventaire exhaustif de 6 918 individus ligneux (DHP \geq 10 cm) répartis sur un réseau homogénéisé de 60 placettes permanentes de 0,25 ha, totalisant 15 hectares d'étude à Isangi, Uma et Mambasa. Afin de garantir la rigueur des inférences, la normalité des distributions a été vérifiée par le test de Shapiro-Wilk. Les comparaisons inter-sites ont été traitées par une ANOVA ou le test de Kruskal-Wallis, tandis que l'influence environnementale a été quantifiée par une analyse de redondance (RDA). Enfin, des corrélations de Spearman ont été mobilisées pour lier les paramètres dendrométriques à la biomasse aérienne (AGB).

Résultats : Les résultats démontrent que l'altitude constitue le moteur fondamental de l'organisation forestière, expliquant 86 % de la variance structurale régionale par l'analyse RDA. Tandis que les massifs de basse altitude (Isangi) se caractérisent par une forte densité de tiges et des structures verticales compressées, les zones plus élevées (Mambasa) favorisent des peuplements ouverts dominés par des individus massifs. L'analyse identifie la surface terrière comme le prédicteur le plus robuste de la biomasse aérienne ($R^2 \geq 0,78$).

Contribution unique à la théorie, à la pratique et à la politique : Cette étude fournit un socle scientifique indispensable pour la territorialisation des mécanismes REDD+ en République Démocratique du Congo. Sur le plan politique, elle préconise de prioriser la préservation de la complexité structurale et des grands arbres émergents plutôt que la seule surveillance de la couverture forestière globale. Pratiquement, elle propose l'adoption de protocoles de suivi carbone différenciés, utilisant la surface terrière comme indicateur pivot pour affiner les estimations de biomasse dans des zones écologiquement contrastées.

Mots clés : *Structure Forestière, Biomasse, Altitude, Bassin du Congo, REDD+.*

Abstract

Purpose: This research aims to analyze the determinants of structural variability in forest stands within the Central Congo Basin, specifically evaluating the influence of the altitudinal gradient on physical organization and carbon storage potential. The study seeks to identify the architectural configurations best suited to maximize biomass sequestration within a sustainable management framework.

Methodology: The approach is based on an exhaustive inventory of 6,918 woody individuals (DBH \geq 10 cm) distributed across a standardized network of 60 permanent 0.25-ha plots, totaling 15 study hectares across Isangi, Uma, and Mambasa. To ensure inferential rigor, distribution normality was systematically verified using the Shapiro-Wilk test. Inter-site comparisons were conducted using ANOVA or the Kruskal-Wallis test, while environmental influence was quantified through Redundancy Analysis (RDA). Finally, Spearman correlations were employed to link dendrometric parameters to Aboveground Biomass (AGB).

Findings: The results demonstrate that altitude is the fundamental driver of forest organization, explaining 86% of the regional structural variance through RDA. While low-altitude forests (Isangi) are characterized by high stem density and compressed vertical structures, higher-altitude areas (Mambasa) favor open stands dominated by massive individuals. The analysis identifies **basal area** as the most robust predictor of aboveground biomass ($R^2 \geq 0.78$).

Unique Contribution to Theory, Practice, and Policy: This study provides an essential scientific foundation for the territorialization of REDD+ mechanisms in the Democratic Republic of the Congo. At the policy level, it advocates for prioritizing the preservation of structural complexity and large emergent trees rather than focusing solely on global forest cover monitoring. Practically, it proposes the adoption of differentiated carbon monitoring protocols, utilizing basal area as a pivotal indicator to refine biomass estimations across ecologically contrasted zones.

Keywords: *Forest Structure, Biomass, Altitude, Congo Basin, REDD+.*

1. Introduction

1.1. Contexte et problématique

Les forêts tropicales du Bassin du Congo représentent le deuxième massif forestier continu de la planète et constituent, par l'ampleur de leurs stocks de biomasse, un pivot essentiel de la régulation climatique mondiale (Malhi et al., 2004 ; Fayolle et al., 2013). Au cœur de cet ensemble, la République Démocratique du Congo occupe une position stratégique majeure, abritant plus de la moitié des forêts tropicales d'Afrique (Luboya et al., 2019). Pourtant, malgré l'importance biogéographique de la Cuvette centrale congolaise, plusieurs dimensions de son organisation écologique demeurent encore imparfaitement documentées (Clark et al., 2001).

Si la composition floristique de ces écosystèmes a fait l'objet d'investigations nombreuses, l'organisation structurale des peuplements demeure relativement peu analysée à l'échelle locale (Fayolle et al., 2013; Luboya et al., 2019). Or, la structure forestière ; définie par l'arrangement spatial des tiges, la distribution des classes de diamètre et la stratification verticale de la végétation ; constitue un indicateur fondamental du fonctionnement écologique (Chave et al., 2014). Ces caractéristiques architecturales régissent non seulement la dynamique de régénération naturelle, mais conditionnent également la capacité des massifs à séquestrer durablement la biomasse ligneuse (Murray et al., 2022).

Cette architecture résulte d'une interaction complexe entre cycles biologiques et contraintes abiotiques (Malhi et al., 2004; Fayolle et al., 2013). Dans les régions tropicales, la théorie du filtrage écologique suggère que les gradients topographiques et édaphiques sélectionnent des assemblages spécifiques, influençant de manière significative la densité des arbres et leur développement vertical (Bohlman et al., 2008). La prise en compte de ces facteurs est aujourd'hui impérative : les politiques internationales de lutte contre les changements climatiques, notamment le mécanisme REDD+, reposent sur des estimations de stocks de carbone dont la fiabilité dépend intrinsèquement de la précision des données structurales (Chave et al., 2014).

Malgré ces enjeux, les connaissances relatives à l'influence des gradients environnementaux sur l'organisation physique des forêts de la Cuvette centrale restent fragmentaires (Luboya et al., 2019). Si les inventaires disponibles décrivent la flore, les analyses reliant la variabilité structurale à des facteurs topographiques précis, en particulier l'altitude, demeurent limitées (Fayolle et al., 2013; Malhi et al., 2004).

Cette lacune scientifique constitue un obstacle majeur à la compréhension des déterminants de la productivité forestière africaine et restreint l'efficacité des outils de suivi, de rapportage et de vérification (MRV) (Chave et al., 2014). Une caractérisation rigoureuse des relations entre architecture forestière, gradient altitudinal et accumulation de biomasse apparaît donc indispensable pour renforcer les bases scientifiques de la gestion durable et de la conservation des écosystèmes forestiers de la région. La présente recherche poursuit les objectifs suivants : (i) caractériser la structure horizontale et la stratification verticale des peuplements forestiers

dans les trois sites étudiés ; (ii) analyser l'influence des gradients environnementaux, en particulier l'altitude, sur l'organisation structurale des forêts ; et (iii) examiner la relation entre les paramètres structuraux des peuplements et la biomasse aérienne afin d'identifier les indicateurs les plus pertinents pour l'évaluation du potentiel de stockage de carbone (Chave et al., 2014; Luboya et al., 2019; Fayolle et al., 2013).

1.2. Revue de la littérature : Structure et dynamique des peuplements forestiers

La structure des peuplements forestiers est classiquement décrite à partir d'indicateurs dendrométriques fondamentaux tels que la densité des arbres, la surface terrière et la distribution des diamètres. Dans les forêts tropicales matures, ces distributions présentent fréquemment une forme caractéristique dite en « J inversé », traduisant la présence d'un grand nombre d'individus de petites dimensions et d'un nombre plus restreint d'arbres de grande taille (Clark & Clark, 2000 ; Chave et al., 2003). Cette configuration reflète généralement des systèmes forestiers dominés par des processus de régénération continue (Clark & Clark, 2000).

La stratification verticale de la végétation constitue également un élément central de l'organisation des écosystèmes forestiers. La répartition des espèces entre la canopée, le sous-étage et les strates inférieures détermine la distribution de la lumière au sein du peuplement et influence directement les processus de croissance et de compétition entre espèces (Poorter et al., 2015).

De nombreuses études ont mis en évidence l'existence d'une relation étroite entre la structure des peuplements forestiers et leur capacité de stockage de biomasse. À l'échelle des forêts tropicales, la surface terrière apparaît notamment comme l'un des indicateurs les plus robustes du volume ligneux et du stock de carbone contenu dans la biomasse aérienne (Lewis et al., 2013 ; Clark & Clark, 2000).

Par ailleurs, les conditions environnementales locales peuvent moduler la structure des peuplements forestiers. Les gradients topographiques, notamment l'altitude, ainsi que les conditions hydrologiques et édaphiques influencent la densité des arbres, leur hauteur et leur croissance, contribuant ainsi à l'émergence de configurations structurales contrastées à l'échelle régionale (Fayolle et al., 2014 ; Vleminckx et al., 2015).

2. Matériels et Méthode

2.1. Description des Sites d'étude

L'étude a été conduite dans trois massifs forestiers représentatifs de la Cuvette centrale congolaise : Isangi et Uma, situés dans la province de la Tshopo, ainsi que Mambasa, localisé dans la province de l'Ituri (Malhi et al., 2013 ; Fayolle et al., 2014). Ces sites ont été sélectionnés en raison de leur position le long de gradients écologiques contrastés et de leur représentativité des principaux types de formations forestières du nord-est du Bassin du Congo (Malhi et al., 2013).

Les massifs d'Isangi et d'Uma appartiennent au domaine des forêts denses humides de basse altitude, caractérisées par des formations sempervirentes à forte stratification verticale et une diversité floristique élevée (Malhi et al., 2013 ; Lewis et al., 2013). Le site de Mambasa correspond quant à lui à une zone de transition vers les formations forestières submontagnardes, où l'augmentation de l'altitude (~900 m) s'accompagne de modifications sensibles des conditions écologiques (Réjou-Méchain et al., 2017). Le climat régional est de type équatorial humide, marqué par des précipitations annuelles comprises entre 1600 et 2000 mm et une saisonnalité modérée, favorisant le maintien d'écosystèmes forestiers denses et structurés (de Wasseige et al., 2021).

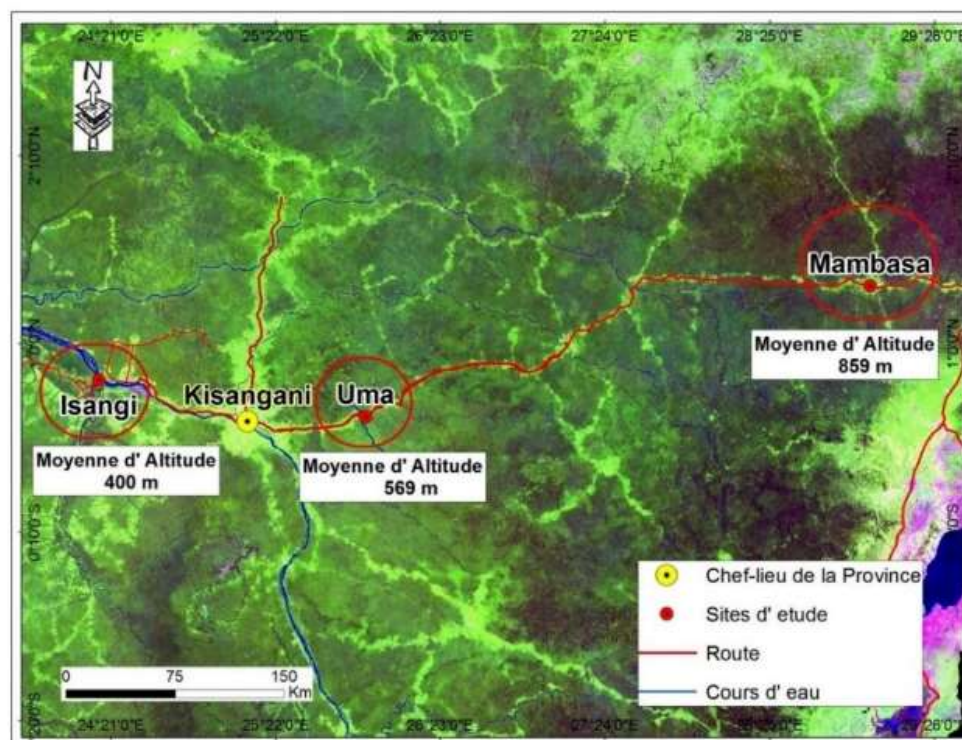


Figure 1. Localisation des sites d'étude dans la Cuvette centrale congolaise

Les trois sites présentent des contrastes édaphiques et topographiques notables. Le paysage forestier d'Isangi se développe sur des sols hydromorphes caractérisés par une saturation périodique en eau (Loke Lobanga et al., 2026). Le site d'Uma est dominé par des plateaux ferrallitiques relativement bien drainés, tandis que le massif de Mambasa se situe dans une zone de relief plus élevé offrant un drainage pédologique plus efficace (Fayolle et al., 2014 ; Vleminckx et al., 2015). Ces disparités environnementales constituent un cadre analytique pertinent pour l'étude comparative de la structure des peuplements (Lewis et al., 2013 ; Fayolle et al., 2014).

2.2. Forces et limites de la démarche méthodologique

La rigueur de cette recherche repose sur un dispositif expérimental de 60 placettes permanentes totalisant 15 hectares d'inventaires exhaustifs ($DHP \geq 10$ cm) (Clark & Clark, 2000 ; Condit, 1998). L'utilisation d'équations allométriques pantropicales validées, intégrant

la densité spécifique du bois, renforce la fiabilité des estimations de biomasse aérienne (AGB) (Chave et al., 2014).

Toutefois, il convient de reconnaître certaines limites inhérentes à cette approche pour garantir une interprétation transparente des résultats (AJERNET, 2024). La taille unitaire des placettes (0,25 ha) peut limiter la capture de la complexité structurale à fine échelle par rapport à des dispositifs de plus grande envergure (Condit, 1998). De plus, l'identification taxonomique réalisée « lorsque cela était possible » peut induire des ambiguïtés résiduelles, bien que la majorité des taxons ait été validée par comparaison avec des spécimens d'herbier (Loke Lobanga et al., 2026). En l'absence de données locales systématiques, l'application d'une valeur moyenne de densité du bois ($0,58 \text{ g/cm}^3$) pour les espèces non documentées constitue une source d'incertitude connue (Chave et al., 2014).

Enfin, la stratification verticale simplifiée (sous-étage vs canopée) et la conception transversale de l'inventaire limitent la compréhension des dynamiques temporelles à long terme (IUFRO, 2021). Les recherches futures gagneraient à intégrer des mesures environnementales plus fines (analyses pédologiques et microclimatiques) et à étendre la taille des unités d'échantillonnage pour affiner la modélisation de la résilience forestière (Lewis et al., 2013 ; Poorter et al., 2015).

2.3. Mesures dendrométriques et caractérisation de la structure forestière

Pour chaque individu recensé, le diamètre à hauteur de poitrine a été mesuré à 1,30 m du sol, ou immédiatement au-dessus des contreforts lorsque ceux-ci étaient présents. La hauteur totale des arbres a également été estimée à l'aide d'un hypsomètre.

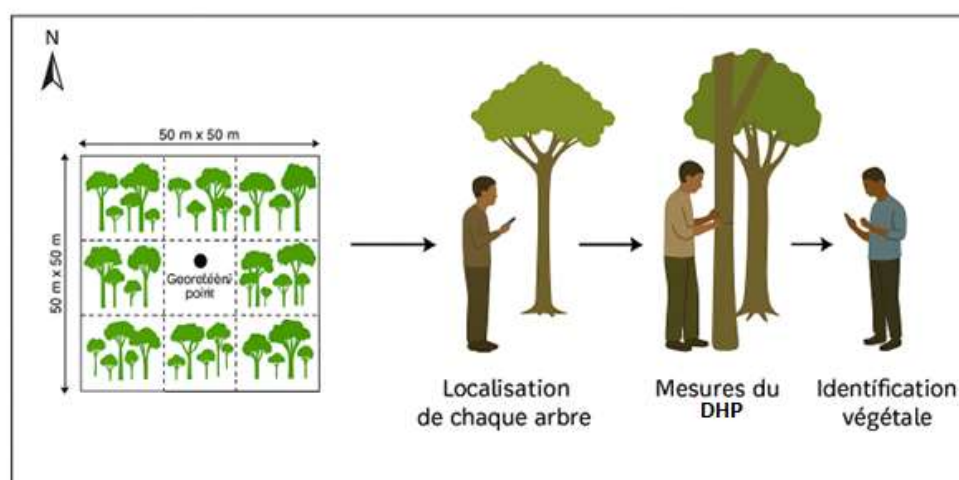


Figure 2. Schéma de Collecte De Données Sur Terrain

- Structure horizontale

La structure horizontale des peuplements a été caractérisée à partir de trois indicateurs principaux : la densité des tiges (arbres/ha), obtenue par conversion du nombre d'individus recensés dans chaque placette à l'hectare ; la surface terrière (G, m^2/ha), calculée comme

la somme des sections basales de tous les arbres présents dans une placette ; la distribution des classes de diamètre, établie par tranches de 10 cm ([10–20[, [20–30[, etc.) afin d'évaluer la structure démographique des peuplements.

La surface terrière individuelle a été calculée selon la formule classique :

$$G = \frac{\pi D^2}{4}$$

où D correspond au diamètre mesuré à hauteur de poitrine.

Dans les forêts tropicales matures, ces distributions diamétriques suivent généralement un profil en « J inversé », caractéristique de peuplements dominés par une régénération continue, comme l'ont observé Luboya et al. (2019) et Murray et al. (2022).

- **Structure verticale**

La stratification verticale a été analysée selon les recommandations de l'Union internationale des instituts de recherches forestières (IUFRO, 2023). Deux strates principales ont été distinguées : le sous-étage, regroupant les individus présentant un DHP ≤ 60 cm, et la canopée, comprenant les arbres de DHP > 60 cm. La proportion d'individus appartenant à chaque strate a été calculée pour chaque placette afin d'évaluer l'organisation verticale des peuplements forestiers.

- **Estimation de la biomasse aérienne**

La biomasse aérienne (Aboveground Biomass – AGB) a été estimée à partir de l'équation allométrique pantropicale proposée par Chave et al. (2014), qui intègre trois prédicteurs : le diamètre, la hauteur totale et la densité spécifique du bois des espèces inventoriées. Cette approche est aujourd'hui largement utilisée pour l'estimation de la biomasse dans les forêts tropicales, car elle permet d'améliorer la précision des estimations de carbone forestier, comme le soulignent Chave et al. (2014) et Murray et al. (2022).

2.4. Analyses statistiques

Les traitements statistiques ont été effectués sous l'environnement R, version 4.5.1. La conformité des variables structurales à la loi normale a été systématiquement évaluée par le test de Shapiro-Wilk. Lorsque les conditions de normalité et d'homogénéité des variances étaient respectées, les comparaisons inter-sites ont été réalisées via une analyse de variance (ANOVA) à un facteur ; dans le cas contraire, le test non paramétrique de Kruskal-Wallis a été privilégié. Les disparités de fréquences entre les strates verticales (sous-étage vs canopée) ont été soumises au test du Chi-carré (χ^2).

Afin de quantifier l'influence du gradient environnemental, et plus spécifiquement de l'altitude, sur l'organisation des peuplements, une analyse de redondance (RDA) a été appliquée sur les variables structurales (densité, surface terrière, hauteur et diamètre moyens). Enfin, les interactions entre la complexité architecturale et le potentiel de séquestration du carbone ont été explorées par des corrélations de Spearman entre les paramètres dendrométriques et la biomasse aérienne (AGB)

3. Résultats

3.1. Caractérisation de la structure horizontale

L'inventaire exhaustif réalisé sur l'ensemble des 60 placettes a permis de recenser 6 918 individus ligneux. Cette population représente une densité moyenne de $461,2 \pm 74,3$ arbres/ha et une surface terrière moyenne de $33,2 \pm 8,4$ m²/ha. L'analyse de la variance (ANOVA) révèle des disparités hautement significatives entre les sites pour la densité ($F = 12,12$; $p < 0,001$) et significatives pour la surface terrière ($F = 3,33$; $p = 0,043$). Ces valeurs s'inscrivent dans les fourchettes observées par Pascal (2003) pour les forêts denses humides de basse altitude.

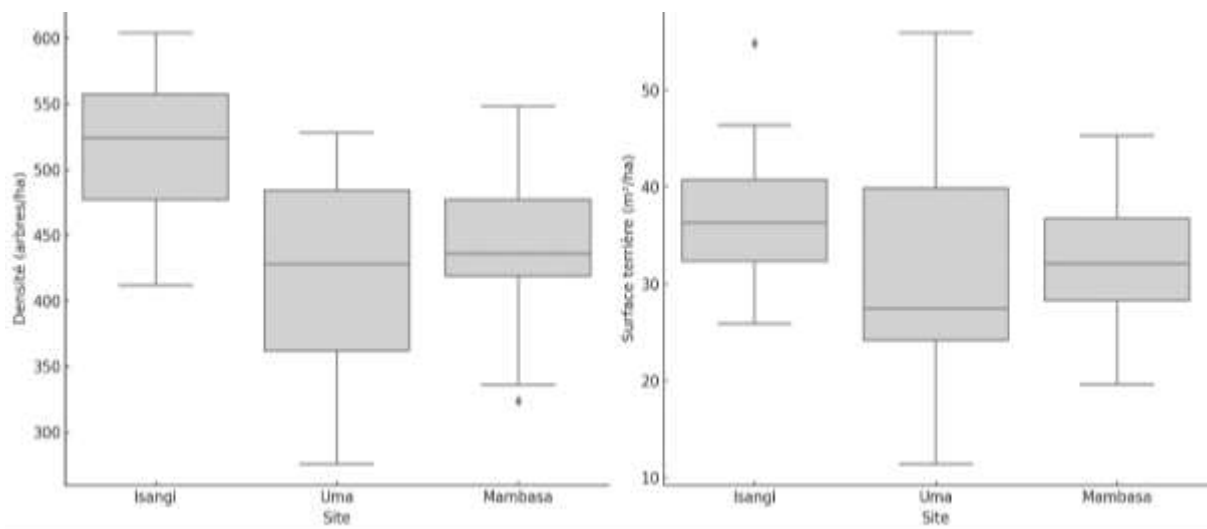


Figure 3. Dispersion des valeurs de la densité et de la surface terrière

La structure diamétrique globale suit un modèle en « J inversé », avec une prépondérance marquée de la classe [10–20[cm, ce qui traduit une dynamique de renouvellement actif et une régénération continue au sein de la Cuvette Centrale. Le test du χ^2 ($\chi^2 = 80,8$; $p < 0,001$) confirme que chaque site possède une signature structurale propre. À Uma, la pente de régression plus abrupte (-0,0228) indique un peuplement jeune en phase de reconstitution rapide, tandis que la pente plus faible à Mambasa (-0,0208) suggère une structure plus hétérogène et une pression anthropique moindre.

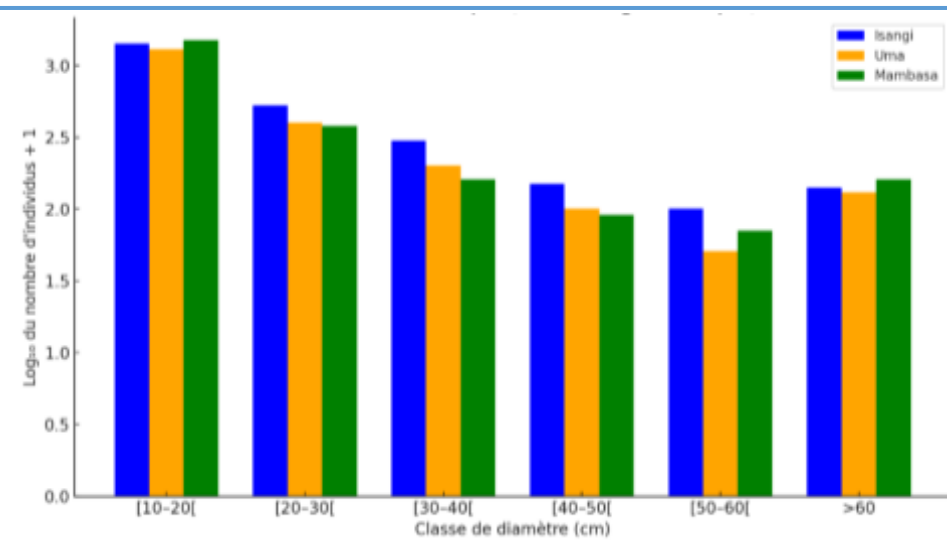


Figure 4. Structure diamétrique des peuplements

Organisation verticale et stratification La hauteur moyenne globale est estimée à $18,6 \pm 5,4$ m, avec une variabilité extrême allant de 2 m à 48 m. L'analyse comparative (Kruskal-Wallis, $p < 0,01$) souligne des contrastes verticaux marqués entre les sites. Isangi présente la canopée la plus mature avec une hauteur moyenne de $17,5 \pm 7,3$ m, tandis que Mambasa affiche la moyenne la plus basse ($12,5 \pm 6,1$ m), reflétant des contextes de perturbation ou de régénération distincts.

Tableau 1. Statistiques descriptives des valeurs de hauteur selon les sites

Site	Hmin. - Hmax (m)	Moy \pm Écart-type (m)
Isangi	2 – 48	$17,5 \pm 7,3$
Uma	3,2 – 26,3	$16,1 \pm 3,3$
Mambasa	2 – 45,9	$12,5 \pm 6,1$

La stratification forestière montre une dominance écrasante du sous-étage ($DHP \leq 60$ cm), qui regroupe 83,8 % des individus. Isangi se distingue par une proportion plus élevée d'arbres de canopée (26,55 %), signalant un peuplement mieux structuré et moins perturbé, contrairement à Uma et Mambasa où la canopée ne représente qu'environ 10 % des tiges.

Tableau 2. Variation du nombre d'individus par strate verticale selon les sites

Site	Sous-étage	Canopée
Isangi	1898 individus (73,45 %)	686 individus (26,55 %)
Uma	1908 individus (90,2 %)	207 individus (9,8 %)
Mambasa	1993 individus (89,82 %)	226 individus (10,18 %)
Global	5790 individus (83,8 %)	1119 individus (16,2 %)

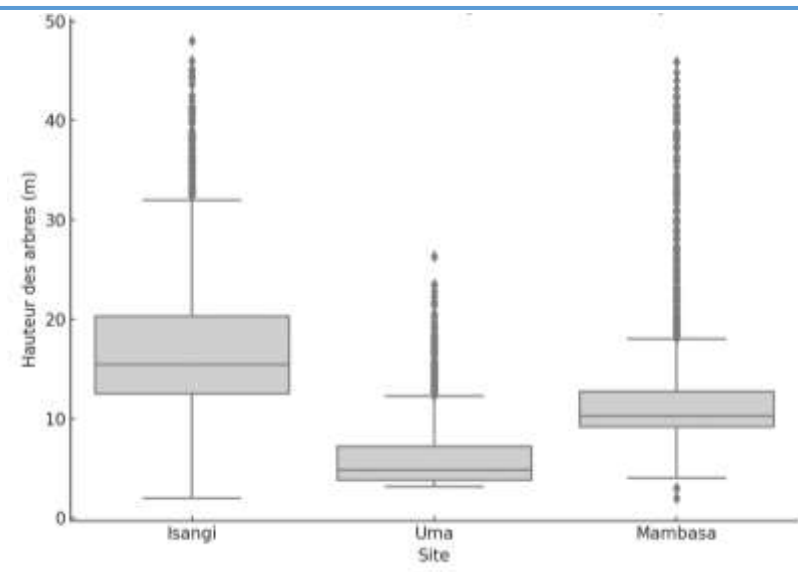


Figure 5. Distribution des hauteurs d'arbres par site

L'analyse des profils verticaux montre que les arbres de la canopée atteignent en moyenne 25 m contre 12 m pour le sous-étage, confirmant la pertinence du critère de stratification basé sur le diamètre. À Mambasa, bien que la moyenne globale soit faible, la présence de grands émergents dans la canopée suggère un historique de perturbation relativement faible ou une transition vers des espèces de climax.

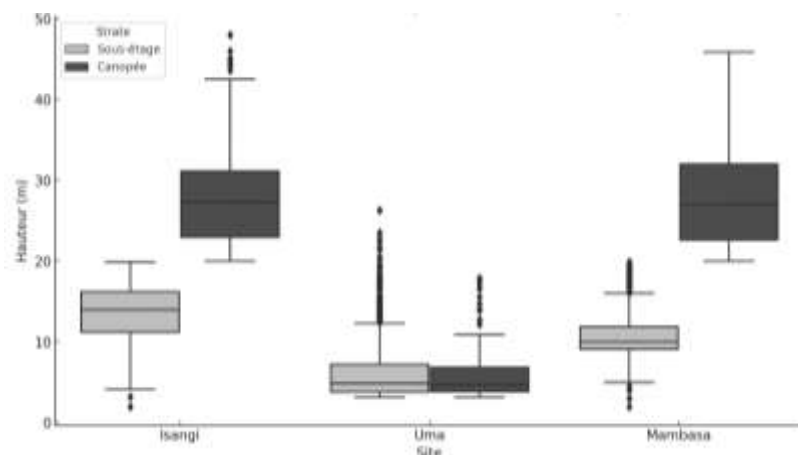


Figure 6. Profils verticaux : distribution des hauteurs par strate et par site

Déterminisme environnemental et gradient altitudinal

L'analyse de redondance (RDA) démontre que l'altitude est un moteur fondamental de la structure forestière, les deux premiers axes expliquant 86 % de la variance. Les forêts de basse altitude (Isangi) sont caractérisées par de fortes densités et de petits diamètres, typiques des milieux hydromorphes limitant le développement vertical. À l'opposé, les sites d'altitude plus élevée (Mambasa) favorisent des structures plus ouvertes dominées par des arbres massifs à forte biomasse.

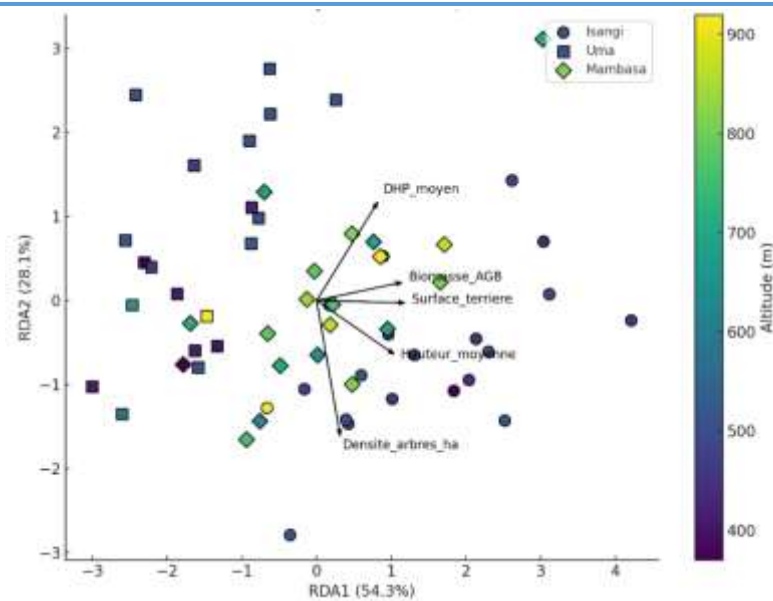


Figure 7. Structure forestière contrainte par l'altitude

3.2. Relations entre structure et potentiel de stockage de carbone (AGB)

L'analyse des corrélations de Spearman confirme un lien robuste entre l'architecture des peuplements et la biomasse aérienne. La surface terrière apparaît comme le prédicteur le plus puissant de la biomasse ($R^2 \geq 0,78$ à Isangi et Uma). La hauteur moyenne et le diamètre montrent également des relations positives significatives, bien que plus variables selon l'influence locale des sols.

En revanche, la densité des tiges présente une relation inverse avec la biomasse. Ce phénomène s'explique par la compétition intraspécifique accrue dans les peuplements denses, où la prolifération de petites tiges limite la croissance individuelle et, par extension, le stock de carbone global. Ces résultats soulignent que la complexité structurale est un indicateur plus fiable du potentiel fonctionnel que la simple abondance des arbres.

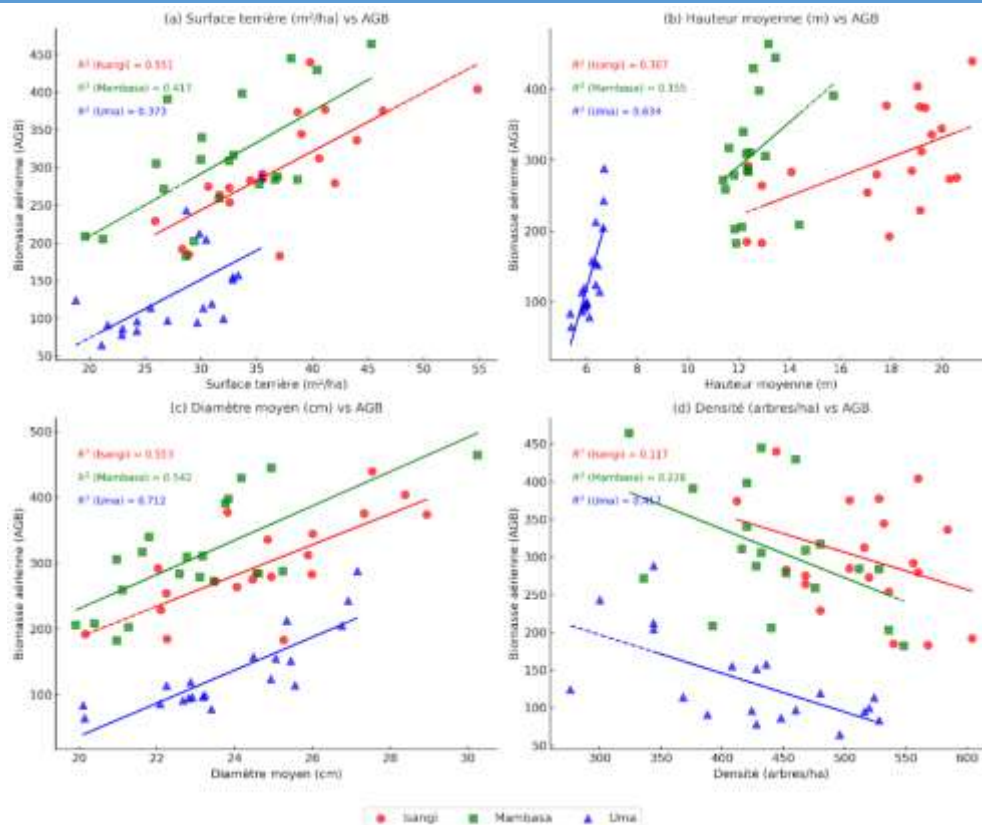


Figure 8. Relation entre biomasse aérienne et quatre variables clés de la structure

4. Discussion

4.1. Variabilité de la structure horizontale et déterminismes environnementaux

L'analyse des données issues de l'inventaire de 6 918 individus révèle une organisation horizontale marquée par une forte hétérogénéité structurale. La densité moyenne observée atteint $461,2 \pm 74,3$ arbres ha^{-1} , pour une surface terrière moyenne de $33,2 \pm 8,4$ m² ha^{-1} . Ces valeurs se situent dans les plages classiquement rapportées pour les forêts denses humides d'Afrique centrale, où les densités varient généralement entre 300 et 700 tiges ha^{-1} , comme le soulignent Clark et al. (2001) et Bohlman et al. (2008).

Les différences significatives observées entre Isangi, Uma et Mambasa ($p < 0,001$) témoignent d'une structuration spatiale fortement conditionnée par les caractéristiques locales du milieu. Bien que ces sites appartiennent au même ensemble biogéographique du Bassin du Congo, leur fonctionnement écologique apparaît modulé par des facteurs édaphiques et topographiques spécifiques. Plusieurs travaux ont montré que les régimes de drainage, la texture des sols et les gradients hydriques influencent directement la distribution spatiale de la biomasse et la densité des peuplements forestiers (Fayolle et al., 2013; Malhi et al., 2004).

La structure diamétrique observée est dominée par les individus de la classe [10–20[cm, ce qui correspond à une distribution en « J inversé », configuration typique des forêts tropicales en régénération continue (Luboya et al., 2019). La pente plus prononcée de la distribution diamétrique observée à Uma suggère un peuplement relativement jeune, caractérisé par une

forte proportion d'individus de petit diamètre. À l'inverse, la structure observée à Mambasa traduit un peuplement plus mature, possiblement lié à une moindre pression anthropique ou à des conditions écologiques plus favorables au développement des arbres de grande dimension.

4.2. Organisation verticale et trajectoires écologiques

La structure verticale des peuplements forestiers étudiés met en évidence une complexité architecturale importante. La hauteur moyenne globale des individus atteint $18,6 \pm 5,4$ m, traduisant l'existence d'une stratification marquée caractéristique des forêts tropicales humides (IUFRO, 2023).

Les différences observées entre sites reflètent des trajectoires écologiques distinctes. Le site d'Isangi présente une canopée relativement structurée, avec une proportion notable d'arbres émergents atteignant les strates supérieures, indiquant un système forestier relativement stable sur le plan fonctionnel. À l'inverse, les profils verticaux observés à Uma et, dans une moindre mesure, à Mambasa apparaissent plus homogènes et dominés par des individus de hauteur intermédiaire, correspondant à des stades successionnels plus récents.

Plusieurs études ont montré que la complexité verticale constitue un indicateur important de la résilience écologique des forêts tropicales. Les peuplements présentant une stratification diversifiée tendent en effet à offrir une plus grande stabilité fonctionnelle face aux perturbations naturelles ou anthropiques (Clark et al., 2001).

4.3. Influence du gradient altitudinal sur l'architecture forestière

L'un des résultats les plus marquants de cette étude réside dans l'identification du rôle déterminant du gradient altitudinal dans la structuration des peuplements forestiers. L'analyse de redondance (RDA) met en évidence que l'altitude explique une proportion importante de la variance observée dans les variables structurales.

Dans les zones de basse altitude, telles que le site d'Isangi, les conditions hydromorphes et la saturation hydrique des sols semblent favoriser des peuplements relativement denses mais présentant un développement vertical plus limité. À l'inverse, les sites situés à des altitudes plus élevées, notamment Mambasa, offrent des conditions de drainage plus favorables au développement de structures forestières plus élancées et à l'accumulation d'arbres de grand diamètre.

Ces résultats confirment les observations formulées dans plusieurs études régionales montrant que les gradients topographiques et altitudinaux constituent des déterminants majeurs de la structure et de la productivité des forêts tropicales africaines (Fayolle et al., 2013; Malhi et al., 2004).

4.4. Implications pour l'évaluation des stocks de carbone et les stratégies REDD+

Les analyses mettent en évidence une relation étroite entre la surface terrière et la biomasse aérienne, avec des coefficients de détermination élevés ($R^2 > 0,80$). Ce résultat confirme que

la surface terrière constitue un indicateur robuste pour l'estimation indirecte des stocks de carbone dans les écosystèmes forestiers tropicaux (Chave et al., 2014).

Toutefois, les données révèlent également une relation inverse entre la densité des tiges et la biomasse totale, suggérant l'existence d'un phénomène de compétition intra-spécifique limitant la croissance diamétrique lorsque les peuplements deviennent trop denses, comme l'ont documenté Bohlman et al. (2008) et Clark et al. (2001).

Dans le contexte des mécanismes REDD+, ces résultats soulignent l'importance stratégique de la préservation des peuplements structurés et de la conservation des arbres de grande dimension, qui jouent un rôle déterminant dans l'accumulation et le stockage du carbone au sein des écosystèmes forestiers tropicaux (Chave et al., 2014; Luboya et al., 2019).

5. Conclusion et recommandations

5.1 Conclusion

Cette étude a permis de quantifier avec précision la variabilité structurale des peuplements forestiers de la Cuvette Centrale Congolaise à travers un échantillonnage robuste de 6 918 individus. Les résultats démontrent que l'architecture de ces forêts n'est pas homogène mais répond à un déterminisme environnemental rigoureux, où l'altitude s'impose comme le moteur principal en expliquant 86 % de la variance structurale.

L'investigation souligne deux conclusions majeures pour la compréhension du fonctionnement de ces écosystèmes. Premièrement, bien que la distribution diamétrique suive globalement un modèle en « J inversé » garantissant le renouvellement des peuplements, chaque site possède une signature écologique propre : Isangi est marqué par une densification horizontale en contexte hydromorphe, tandis que Mambasa favorise un développement vertical et une maturité accrue. Deuxièmement, l'étude valide l'existence d'une relation inverse entre la densité des tiges et la biomasse aérienne (AGB). Ce phénomène de compétition intraspécifique prouve que la simple abondance des arbres n'est pas un indicateur suffisant du potentiel de stockage de carbone. En définitive, la surface terrière et la hauteur moyenne s'affirment comme les prédicteurs les plus fiables de la complexité fonctionnelle de ces forêts.

5.2 Recommandations pratiques et politiques (Stratégie REDD+)

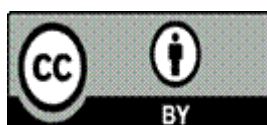
Les résultats de cette étude imposent un changement de paradigme pour les stratégies REDD+ en République Démocratique du Congo, en privilégiant désormais la complexité structurale et la préservation des arbres émergents plutôt que le simple suivi global du couvert forestier. L'effort de conservation doit se focaliser sur la surface terrière comme indicateur pivot des systèmes de suivi (MRV) territorialisés, afin de mieux refléter l'hétérogénéité des massifs le long des gradients altitudinaux. À l'inverse, l'abondance des tiges doit être nuancée, car une densité excessive peut induire une compétition intraspécifique limitant l'accumulation globale de biomasse. Pour la recherche scientifique, il est impératif d'adopter une approche multidimensionnelle intégrant des caractérisations pédologiques fines et l'historique des perturbations pour élucider les variations de biomasse encore inexplicables.

La robustesse des modèles de structuration gagnerait également à être éprouvée par une extension du réseau de placettes permanentes vers les forêts de transition et les massifs montagneux de l'Est du pays. Enfin, l'exploration du lien fonctionnel entre biodiversité et carbone demeure un enjeu majeur, car la diversité taxonomique agit comme un véritable amplificateur d'efficacité et un moteur de résilience pour les peuplements forestiers face aux changements globaux

6. Références bibliographiques

- Bastin, J.-F., Rutishauser, E., Kellner, J. R., Saatchi, S., & Gibbs, H. K. (2019). *Carbon storage and forest structure in Central Africa*. *Nature Geoscience*, 12, 231–237.
- Chave, J., Condit, R., Aguilar, S., Hernandez, A., Lao, S., & Perez, R. (2003). *Structural and phylogenetic determinants of wood density in tropical forests*. *The American Naturalist*, 162(4), 451–463.
- Chave, J., Réjou-Méchain, M., Búrquez, A., Chidumayo, E., Colgan, M., Delitti, W., et al. (2014). *Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees*. *Global Change Biology*, 20, 3177–3190.
- Clark, D. B., & Clark, D. A. (2000). *Landscape-scale variation in forest structure and biomass in a tropical rain forest*. *Forest Ecology and Management*, 137, 185–198.
- Cuni-Sanchez, A., Sullivan, M. J. P., Platts, P. J., Lewis, S. L., Marchant, R., Imani, G., et al. (2021). *High aboveground carbon stock of African tropical montane forests*. *Nature*, 596, 536–542.
- Fayolle, A., Doucet, J.-L., Gillet, J.-F., Bourland, N., & Lejeune, P. (2014). *Geographic patterns of tree species composition across tropical African forests*. *Journal of Biogeography*, 41(10), 1904–1914.
- Lewis, S. L., Sonké, B., Sunderland, T., Begne, S. K., Lopez-Gonzalez, G., van der Heijden, G. M. F., et al. (2013). *Above-ground biomass and structure of 260 African tropical forests*. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 368, 20120295.
- Malhi, Y., Adu-Bredu, S., Asare, R. A., Lewis, S. L., & Mayaux, P. (2013). *African rainforests: Past, present and future*. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 368(1625), 20120312.
- Pascal, J.-P. (2003). *Notions sur les structures et la dynamique des forêts tropicales humides*. *Revue d'Écologie*, 58, 45–62.
- Poorter, L., Bongers, F., Aide, T. M., Zambrano, A. M. A., Balvanera, P., Becknell, J. M., et al. (2015). *Diversity enhances carbon storage in tropical forests*. *Global Ecology and Biogeography*, 24, 1314–1328.
- R Core Team. (2025). *R: A language and environment for statistical computing*. Vienna: R Foundation for Statistical Computing.

- Réjou-Méchain, M., Baccini, A., Santoro, M., Saatchi, S., Bugnet, M., & Lewis, S. L. (2017). *Using local data to improve regional aboveground biomass maps*. *Remote Sensing of Environment*, 197, 1–11.
- Vleminckx, J., Doucet, J.-L., Morin-Rivat, J., Biwolé, A., Daïnou, K., et al. (2015). *Climatic and edaphic controls on tree species distribution in African rainforests*. *Journal of Vegetation Science*, 26, 124–137.



©2026 by the Authors. This Article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)