

Prédire la biomasse à l'interface des gradients altitudinaux et floristiques : une approche intégrée appliquée aux massifs d'Isangi, Uma et Mambasa en République Démocratique du Congo

Evariste Loke Lobanga¹
Roger Katusi²
Janvier Lisingo wa Lisingo³
Thom's Kavali Tondo⁴
Isaac Bosuandole Bolila⁵
Bosco Ndjango Ngona⁶
Damien Essala Atickwe⁷
Adot Bondjandi Lotombo⁸
Michel Mbasi Mbula⁹
Christophe Lomba Bosombo¹⁰

juniork20001@gmail.com

^{1,2,3,4,6,9,10}Université de Kisangani, ^{5,7,8}Institut Supérieur Pédagogique d'Isangi, ^{1,2,3,4,5,6,7,8,9,10}République Démocratique du Congo (RDC)

<https://doi.org/10.51867/ajernet.7.1.128>

RESUME

En République Démocratique du Congo (RDC), la valorisation du rôle climatique des forêts dans le cadre du mécanisme REDD+ dépend de la précision des systèmes de suivi du carbone (MRV). Cette étude évalue comment la diversité des espèces d'arbres et l'architecture des massifs influencent les stocks de biomasse aérienne (AGB) le long de gradients écologiques contrastés. La méthodologie repose sur l'inventaire rigoureux de 60 placettes permanentes de 0,25ha réparties à Isangi, Uma et Mambasa. Les analyses démontrent que l'intégration conjointe de la richesse spécifique, de la surface terrière et de l'altitude permet d'expliquer entre 82 % et 91 % de la variabilité de la biomasse. Ces résultats prouvent que la diversité végétale agit comme un amplificateur de précision, surpassant nettement les modèles forestiers classiques. Sur le plan pratique, nous recommandons l'intégration systématique de la composition spécifique et des variables topographiques dans les protocoles nationaux de suivi forestier. Cette approche offre un levier concret pour fiabiliser les bilans carbones de la RDC, garantissant ainsi la crédibilité des politiques de gestion durable et des financements climatiques dans le Bassin du Congo. L'étude conclut que la préservation de la diversité floristique n'est pas seulement une priorité écologique, mais aussi une exigence stratégique pour améliorer la précision et la crédibilité des mécanismes d'atténuation du changement climatique dans les systèmes forestiers tropicaux. Enfin, l'étude recommande un effort coordonné combinant les technologies avancées, la collaboration institutionnelle et les connaissances écologiques afin d'assurer une mise en œuvre efficace des objectifs de REDD+ dans le bassin du Congo.

Mots-clés : Biomasse Aérienne, Diversité Floristique, Modélisation Intégrée, REDD+, République Démocratique du Congo, Structure Forestière

ABSTRACT

In the Democratic Republic of Congo (DRC), valuing the climatic role of forests under the REDD+ mechanism depends on the accuracy of carbon monitoring systems (MRV). This study evaluates how tree species diversity and stand architecture influence aboveground biomass (AGB) stocks along contrasting ecological gradients. The methodology is based on a rigorous inventory of 60 permanent plots (0.25 ha each) distributed across Isangi, Uma, and Mambasa. Analyses demonstrate that the joint integration of species richness, basal area, and altitude explains between 82% and 91% of biomass variability. These results prove that plant diversity acts as a precision amplifier, significantly outperforming traditional forestry models. On a practical level, we recommend the systematic integration of species composition and topographic variables into national forest monitoring protocols. This approach offers a concrete lever to enhance the reliability of carbon assessments in the DRC, thereby ensuring the credibility of sustainable management policies and climate financing in the Congo Basin. The study concludes that preserving floristic diversity is not only an ecological priority but also a strategic requirement for improving the accuracy and credibility of climate change mitigation mechanisms in tropical forest systems. Finally, the study recommends a coordinated effort combining advanced technologies, institutional collaboration, and ecological knowledge to ensure effective implementation of REDD+ objectives in the Congo Basin.

Keywords: Aboveground Biomass, Floristic Diversity, Forest Structure, Integrated Modeling, REDD+, Democratic Republic of Congo

I. INTRODUCTION

Le Bassin du Congo constitue le deuxième massif forestier tropical continu de la planète après l'Amazonie et joue un rôle majeur dans la régulation du climat mondial. La République démocratique du Congo en abrite la plus grande part, représentant une proportion considérable des forêts tropicales africaines et un élément essentiel du patrimoine écologique mondial [1,2]. Ces écosystèmes forestiers assurent de multiples fonctions écologiques, notamment la conservation de la biodiversité, la régulation hydrologique et le stockage du carbone. Au sein de cet ensemble forestier, la Cuvette centrale congolaise occupe une position particulière en raison de l'étendue de ses formations végétales et de la diversité des contextes écologiques qui structurent ses paysages. Les complexes tourbeux qui y sont présents représentent l'un des plus importants réservoirs de carbone organique des régions tropicales, avec des stocks estimés à plusieurs dizaines de milliards de tonnes [3]. Cette capacité exceptionnelle de stockage confère aux forêts de la région un rôle stratégique dans l'atténuation des changements climatiques.

Dans ce contexte, les initiatives internationales de lutte contre le changement climatique, notamment les mécanismes de réduction des émissions issues de la déforestation et de la dégradation des forêts (REDD+), accordent une importance croissante à l'évaluation des stocks de biomasse et de carbone forestiers. La mise en œuvre de ces dispositifs repose sur des systèmes rigoureux de suivi, de rapportage et de vérification (MRV) permettant d'estimer de manière fiable l'évolution des ressources forestières [4]. Les massifs forestiers d'Isangi, d'Uma et de Mambasa, situés dans la partie nord-orientale de la République démocratique du Congo, offrent un cadre d'étude particulièrement pertinent pour analyser ces dynamiques écologiques. Leur position le long de gradients environnementaux marqués, notamment altitudinaux et hydromorphes, permet d'examiner l'influence des conditions écologiques locales sur l'organisation structurale des peuplements forestiers et sur leur capacité d'accumulation de biomasse. Malgré l'importance écologique et climatique des forêts du Bassin du Congo, la quantification précise de leurs stocks de biomasse demeure un défi scientifique majeur. Les méthodes classiques d'estimation reposent principalement sur des variables dendrométriques telles que le diamètre des arbres ou la surface terrière, alors que d'autres dimensions écologiques, notamment la composition floristique et la structure des peuplements, peuvent également influencer de manière significative l'accumulation de biomasse [5].

Les équations allométriques pantropicales couramment utilisées pour estimer la biomasse aérienne constituent un outil indispensable dans les études forestières, mais leur application à l'échelle locale peut introduire des incertitudes liées à la diversité taxonomique et aux particularités écologiques des forêts tropicales africaines [6]. Cette situation souligne la nécessité de développer des approches analytiques intégrant un ensemble plus large de variables écologiques afin d'améliorer la précision des estimations. Par ailleurs, plusieurs limites méthodologiques caractérisent encore les travaux disponibles. Les études conduites dans les forêts tropicales d'Afrique centrale reposent souvent sur des dispositifs d'échantillonnage spatialement restreints, qui ne permettent pas toujours de capturer l'ensemble de l'hétérogénéité écologique des paysages forestiers. De même, l'absence de séries temporelles longues limite la compréhension des dynamiques de résilience des écosystèmes forestiers et de leur capacité à maintenir leur rôle de puits de carbone dans un contexte de pressions anthropiques croissantes. Enfin, certaines approches statistiques fréquemment mobilisées dans les analyses écologiques, telles que les analyses de réduction de dimension ou les modèles linéaires simplifiés, peuvent conduire à une représentation partielle des interactions complexes qui structurent les écosystèmes forestiers tropicaux. Ces limites soulignent l'intérêt d'approches analytiques intégrant simultanément la diversité floristique et les caractéristiques structurales des peuplements forestiers.

1.1 Objectif de la Recherche

- i. identifier les variables floristiques et structurales les plus déterminantes dans l'explication de la variabilité de la biomasse aérienne ;
- ii. évaluer la contribution de la richesse spécifique à l'amélioration des modèles prédictifs de biomasse par rapport aux approches reposant uniquement sur des variables dendrométriques ;
- iii. tester la robustesse statistique de modèles intégrés dans une perspective opérationnelle pour les systèmes de suivi, de rapportage et de vérification des stocks de carbone ;
- iv. proposer un cadre analytique susceptible de contribuer au développement de stratégies de gestion durable et de conservation des forêts tropicales du Bassin du Congo.

II. METHODOLOGY

2.1 Description des Sites D'étude

L'étude a été réalisée dans trois massifs forestiers situés dans la Cuvette centrale congolaise, en République démocratique du Congo : Isangi (0°46' N, 24°16' E), Uma (0°34' N, 25°52' E) et Mambasa (1°22' N, 29°03' E). Ces sites ont été retenus en raison de leur représentativité des principaux contextes écologiques des forêts denses humides de la région.

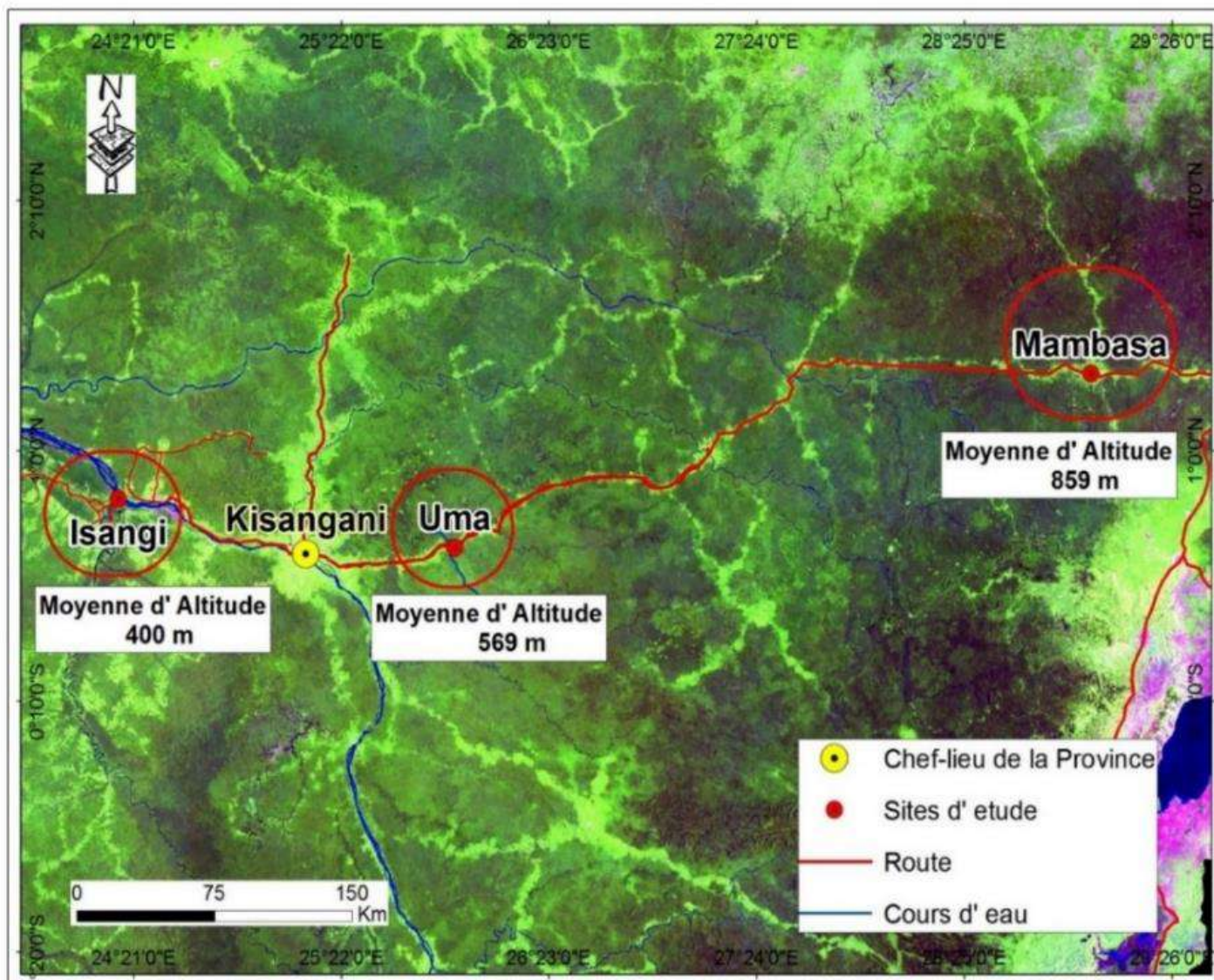


Figure 1
Carte de la Localisation des Sites D'étude

Le site d'Isangi correspond à des formations forestières de basse altitude caractérisées par des conditions hydromorphes, avec une altitude moyenne d'environ 400 m. Uma se situe sur des formations de terre ferme subhygrophiles autour de 560 m d'altitude, tandis que Mambasa marque une transition vers des formations forestières plus élevées, proches des milieux submontagnards, atteignant approximativement 900 m d'altitude. L'ensemble de ces sites couvre ainsi un gradient écologique marqué, associant des variations d'altitude, de drainage des sols et de conditions hydriques. Ce dispositif permet d'examiner l'influence de ces facteurs environnementaux sur l'organisation structurelle des peuplements forestiers dans la Cuvette centrale [8].

2.2 Dispositif Expérimental Et Echantillonnage

Le dispositif d'étude repose sur un réseau de 60 placettes permanentes de 50 m × 50 m (0,25 ha chacune), réparties de manière équilibrée entre les trois massifs forestiers étudiés, à raison de 20 placettes par site. Cette configuration permet de disposer d'un échantillonnage spatial suffisamment représentatif pour analyser la variabilité structurelle des peuplements forestiers.

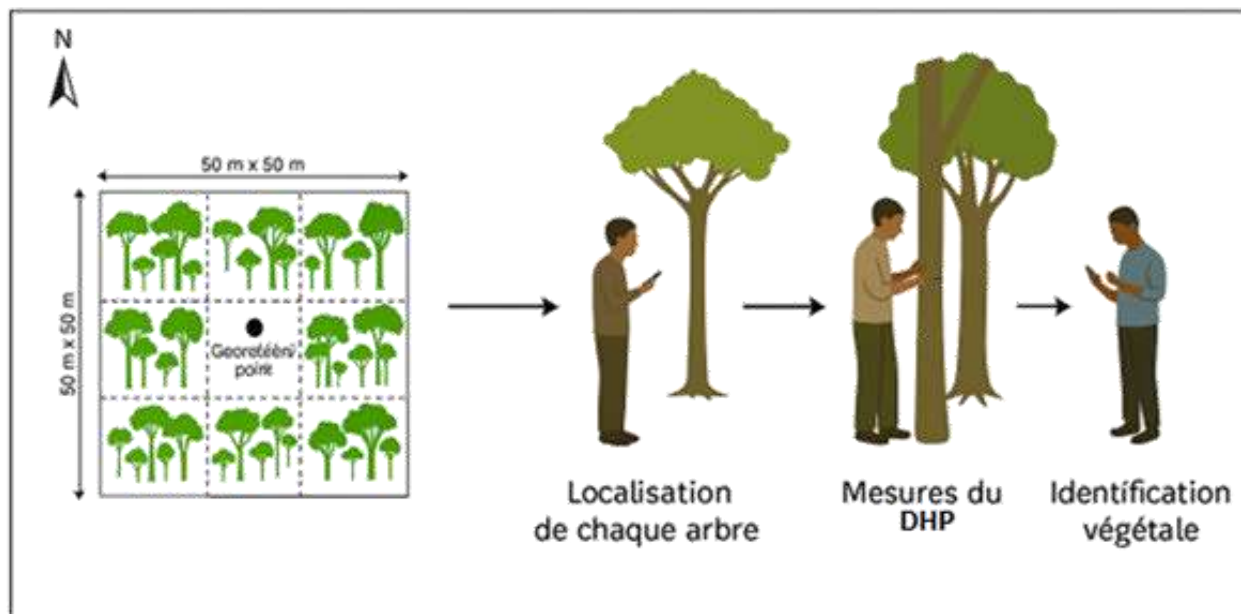


Figure 2
Schéma de Collecte De Données Sur Terrain

L'implantation des placettes a été réalisée de manière à couvrir les principales variations locales de topographie et de conditions écologiques. Chaque placette a été considérée comme une unité d'observation indépendante dans les analyses statistiques. Au sein de chaque unité, l'ensemble des individus ligneux présentant un diamètre à hauteur de poitrine (DHP) supérieur ou égal à 10 cm a été recensé conformément aux protocoles standards d'inventaire forestier tropical [9].

2.3 Inventaire Et Identification Des Espèces

Les inventaires floristiques ont été réalisés directement sur le terrain par une équipe de botanistes expérimentés. L'identification des espèces a été effectuée à partir de caractères morphologiques observables in situ. Lorsque l'identification sur le terrain s'avérait incertaine, des échantillons botaniques ont été collectés et comparés aux collections de référence conservées à l'Herbarium de la Faculté des Sciences de l'Université de Kisangani. La nomenclature taxonomique adoptée suit la classification phylogénétique proposée par le système de *Angiosperm Phylogeny Group* [10]. Les diamètres des arbres ont été mesurés à 1,30 m du sol à l'aide d'un ruban dendrométrique, tandis que les hauteurs totales ont été estimées à l'aide d'un hypsomètre Vertex IV.

2.4 Estimation de la Biomasse Aérienne

La biomasse aérienne des arbres a été estimée à partir de l'équation allométrique pantropicale proposée pour les forêts humides tropicales [11] :

$$AGB = 0,0673 \times (\rho \times D^2 \times H)^{0,976} \quad (1)$$

où ρ représente la densité spécifique du bois (g/cm^3), D le diamètre à hauteur de poitrine (cm) et H la hauteur totale de l'arbre (m). Les valeurs de densité du bois ont été extraites de la base de données mondiale compilée par Zanne *et al.* [12]. Lorsque l'information spécifique n'était pas disponible pour une espèce donnée, une valeur moyenne de $0,58 \text{ g/cm}^3$ a été utilisée conformément aux recommandations méthodologiques pour les forêts tropicales. Cette approche permet d'obtenir des estimations comparables de biomasse aérienne dans les différents contextes écologiques étudiés.

2.5 Analyses Statistiques Et Modélisation

Les analyses statistiques ont été réalisées à l'aide du logiciel R (version 4.2.3). Dans un premier temps, les variables décrivant la diversité floristique et la structure des peuplements ont été explorées afin d'évaluer leur distribution et les relations de colinéarité éventuelles. Compte tenu de la forte corrélation observée entre certains indices de diversité, une analyse en composantes principales (ACP) a été appliquée afin de synthétiser ces variables en un indicateur composite. Cette approche permet de réduire la dimension du jeu de données tout en conservant l'essentiel de l'information écologique [13]. Plusieurs types de modèles statistiques ont ensuite été comparés afin d'identifier les déterminants de la variation de la biomasse aérienne. Les analyses ont notamment mobilisé des modèles de régression linéaire multiple, des modèles linéaires généralisés et des modèles linéaires mixtes généralisés intégrant l'effet du site comme facteur aléatoire. Cette approche permet de tenir compte de l'hétérogénéité écologique entre les différents

massifs forestiers étudiés. Enfin, la robustesse des modèles a été évaluée par validation croisée à dix plis, en considérant notamment l'erreur quadratique moyenne (RMSE) et le coefficient de détermination prédictif (R^2).

III. RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1 Résultats

3.1.1 Tendances Générales de la Biomasse et Déterminants Ecologiques

L'analyse intégrée des données met en évidence que la biomasse aérienne (AGB) observée dans les forêts de la Cuvette centrale congolaise ne résulte pas uniquement de la dimension individuelle des arbres, mais procède d'interactions complexes entre la structure des peuplements, la composition floristique et les contraintes environnementales locales. Les résultats montrent, en premier lieu, une hétérogénéité spatiale marquée du stock de biomasse, avec des valeurs moyennes culminant à Mambasa (378,1 t/ha) et à Isangi (347,9 t/ha), tandis que le site d'Uma présente des valeurs sensiblement plus faibles.

En second lieu, l'intégration de la diversité floristique dans les modèles explicatifs améliore significativement la précision des estimations de biomasse lorsque cette variable est combinée aux paramètres structuraux du peuplement. Cette observation confirme l'hypothèse selon laquelle la diversité spécifique favorise une utilisation plus efficace des ressources et des strates verticales du couvert forestier. Enfin, l'analyse révèle que l'altitude agit comme un modérateur écologique important, susceptible d'influencer la capacité de stockage de biomasse à structure forestière comparable. Ce gradient altitudinal reflète vraisemblablement des variations concomitantes des conditions édaphiques, microclimatiques et des traits fonctionnels des espèces dominantes.

3.1.2 Variabilité Inter-Sites et Dynamiques Ecologiques Contrastées

Les comparaisons statistiques mettent en évidence des différences significatives entre les trois sites étudiés (ANOVA : $F = 8,45$; $p < 0,001$), révélant des trajectoires écologiques distinctes. Isangi (≈ 400 m d'altitude). Ce site se caractérise par une densité moyenne élevée atteignant 516,8 tiges/ha et par une structure forestière relativement fermée, dominée par des espèces telles que *Entandrophragma palustre*. Les conditions hydromorphes du milieu limitent localement le développement vertical des arbres mais favorisent une accumulation dense de biomasse par unité de surface. Uma (≈ 560 m d'altitude). Ce massif présente la richesse spécifique la plus élevée de l'étude (42,7 espèces par placette) tout en affichant les stocks de biomasse les plus modestes (275,3 t/ha). Ce paradoxe apparent s'explique par un régime de perturbations modérées qui stimule la régénération et maintient une structure dominée par des individus de petits et moyens diamètres, caractéristique des distributions diamétriques en « J inversé ». Mambasa (≈ 900 m d'altitude) Situé dans une zone de transition vers les formations submontagnardes du nord-est du Bassin du Congo, ce site abrite des peuplements forestiers plus matures, marqués par une proportion élevée d'arbres de grand diamètre. Cette configuration structurelle explique les stocks de biomasse particulièrement élevés observés dans cette région (378,1 t/ha).

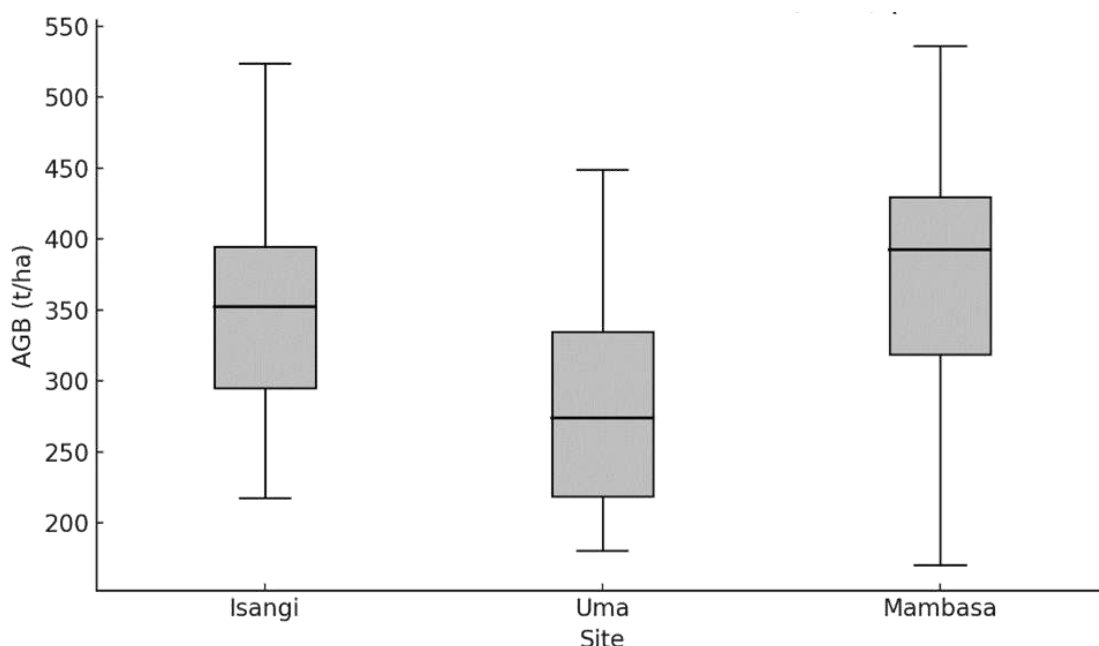


Figure 3

Distribution de la Biomasse Aérienne (AGB) Par Site, Illustrant la Singularité Statistique du site d'Uma par Rapport aux Massifs d'Isangi et Mambasa

3.1.3 Performance et Justification Du Modèle Statistique

La structure hiérarchique du dispositif d'échantillonnage ; les placettes étant imbriquées au sein de sites écologiques distincts ; a conduit à privilégier l'utilisation d'un modèle linéaire mixte généralisé (GLMM) pour l'analyse des déterminants de la biomasse.

Tableau 1

Diagnostic de Colinéarité et Sélection des Variables Explicatives

| Variable | VIF | Décision | Interprétation statistique | Interprétation écologique |
|-------------------------------------|--------|--------------------------|---|--|
| Indice de Shannon (H') | 116,44 | À reconsidérer / Exclure | VIF très élevé (> 10), forte colinéarité avec d'autres indices floristiques | Bien que capturant la complexité fonctionnelle, il est redondant avec Simpson et Richesse ; son inclusion risque de rendre des coefficients instables. |
| Indice de Simpson (D) | 34,34 | Exclure | VIF élevé, colinéarité forte | Redondant avec Shannon et Richesse, peu d'apport supplémentaire pour la biomasse. |
| Richesse spécifique (S) | 34,46 | Exclure | VIF élevé, colinéarité forte | Souligne le nombre d'espèces mais redondant avec d'autres mesures de diversité ; peu utile seul pour prédire l'AGB. |
| Surf. Terrière (m ² /ha) | 5,42 | Conserver | VIF légèrement > 5 mais acceptable | Principal déterminant de la biomasse ; reflète la base de capture de lumière et le volume de bois. |
| DHP moyen pondéré (cm) | 4,99 | Conserver | VIF < 5, colinéarité modérée | Traduit la taille moyenne des arbres ; plus le diamètre pondéré est élevé, plus l'AGB tend à augmenter. |
| Hauteur moyenne (m) | 3,85 | Conserver | VIF < 5, colinéarité faible à modérée | Mesure complémentaire de la structure verticale ; les peuplements plus hauts stockent généralement plus de biomasse. |
| Densité (arbres/ha) | 3,28 | Conserver | VIF < 5, colinéarité modérée | Informe sur la compétition et la composition structurelle ; utile pour capturer des effets de densité sur l'AGB. |

Comparativement aux modèles linéaires classiques, qui expliquent environ 52 % de la variance de l'AGB à partir de la seule surface terrière, le modèle GLMM intégrant l'effet aléatoire « site » améliore substantiellement la qualité d'ajustement, avec un R² conditionnel atteignant 0,91. La sélection du modèle repose sur l'évaluation conjointe des critères d'information d'Akaike et de Schwarz (AIC et BIC), lesquels indiquent que le GLMM offre le meilleur compromis entre pouvoir explicatif et parcimonie statistique. Par ailleurs, l'analyse des résidus confirme la conformité du modèle aux hypothèses statistiques usuelles, notamment la normalité des erreurs et l'absence d'hétéroscédasticité, ce qui atteste de la robustesse des estimations produites.

Tableau 2

Comparaison des Performances des Modèles MLR, GLM et GLMM, Montrant la Supériorité du GLMM (R² Conditionnel = 0,91)

| Modèle | AIC | BIC | R ² marginal | R ² conditionnel | RMSE (t/ha) |
|--------|--------|---------|-------------------------|-----------------------------|-------------|
| MLR | 628,82 | 639,29 | | | 42,01 |
| GLM | 633,75 | -224,08 | | | 50,57 |
| GLMM | nan | nan | 0,61 | 0,91 | 50,38 |

3.1.4 Interprétation écologique des principaux prédicteurs

Les coefficients estimés par le modèle final mettent en évidence plusieurs relations fonctionnelles cohérentes avec les mécanismes écologiques décrits dans les forêts tropicales. La surface terrière constitue le déterminant le plus fortement associé à la biomasse aérienne (Estimate = 16,8). Cette variable synthétise le volume ligneux total du peuplement et reflète directement l'accumulation de carbone dans les compartiments arborés. La richesse spécifique, représentée par l'axe principal de l'analyse factorielle (PC1), exerce également un effet positif significatif. Cette relation suggère que la diversité floristique favorise des mécanismes de complémentarité fonctionnelle entre espèces, améliorant l'efficacité globale d'exploitation des ressources lumineuses et édaphiques.

À l'inverse, la densité de tiges présente un effet négatif modéré (Estimate = -0,55). Une densité trop élevée intensifie la compétition intra- et interspécifique pour la lumière et les nutriments, limitant la croissance diamétrique individuelle et réduisant, à terme, la biomasse moyenne par arbre. Enfin, l'altitude apparaît comme un facteur environnemental modulant ces relations (Estimate = 0,09). Les peuplements situés à plus haute altitude semblent stocker davantage de biomasse à structure comparable, possiblement en raison de la dominance d'espèces à bois plus dense ou de conditions microclimatiques ralentissant les processus de décomposition.

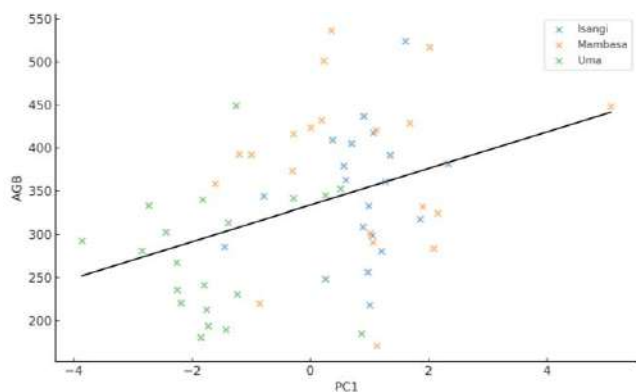


Figure 3
Relation entre AGB et PC1

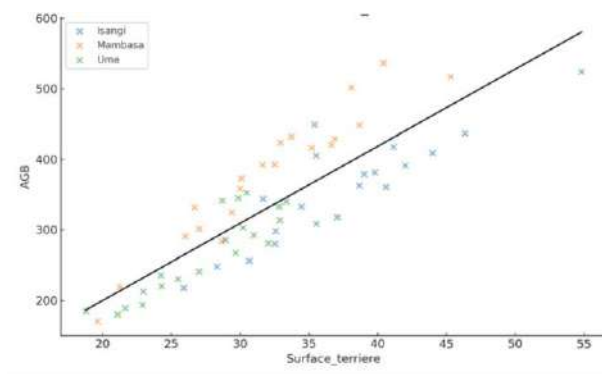


Figure 4
Relation entre AGB et Surface Terrière

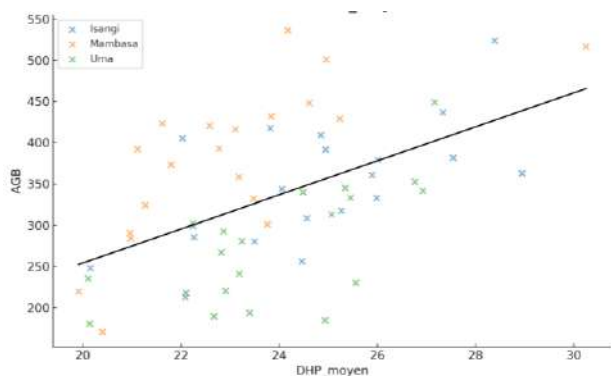


Figure 5
Relation entre AGB et DHP Moyen Pondéré

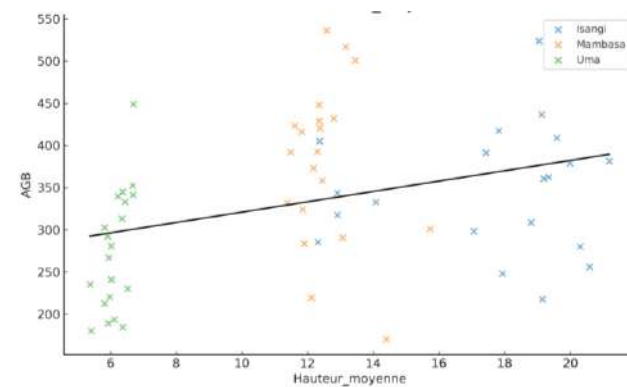


Figure 6
Relation Entre AGB et Hauteur Moyenne

Tableau 3
Paramètres du Modèle Final avec l'Altitude comme Covariable Fixe

| Paramètre | Estimate | StdErr | IC 95% bas | IC 95% haut | Inclusion |
|-------------------|----------|--------|------------|-------------|-----------|
| const. | 341,99 | 154,9 | 38,42 | 645,57 | Oui |
| Shannon | 9,46 | 8,8 | -7,54 | 26,46 | Oui |
| Surface_terriere | 16,84 | 1,4 | 14,02 | 19,67 | Oui |
| DHP_moyen | -15,91 | 4,99 | -25,7 | -6,11 | Oui |
| Densite_arbres_ha | -0,55 | 0,13 | -0,79 | -0,31 | Oui |
| Altitude | 0,09 | 0,03 | 0,03 | 0,15 | Oui |

3.1.5 Limites de l'étude et Perspectives de Recherche

Malgré la solidité des résultats obtenus, plusieurs limites doivent être prises en considération. Premièrement, l'analyse repose sur trois sites principaux, ce qui peut restreindre la représentativité de certains gradients écologiques présents dans l'ensemble de la Cuvette centrale congolaise. Deuxièmement, l'estimation de la biomasse s'appuie sur des équations allométriques pantropicales, dont l'application peut introduire une incertitude résiduelle liée aux spécificités morphologiques des essences locales. Enfin, l'approche adoptée demeure essentiellement transversale. L'intégration de séries temporelles issues de placettes permanentes permettrait d'analyser plus finement les flux dynamiques de recrutement, de croissance et de mortalité qui structurent les trajectoires écologiques des forêts tropicales.

3.2 Discussion

3.2.1 Pertinence des Modèles Intégrés Dans le Contexte de la Cuvette Centrale

Les résultats obtenus confirment la supériorité des modèles de régression mixtes généralisés (GLMM) intégrant simultanément des variables floristiques et structurales pour l'estimation de la biomasse aérienne dans les forêts tropicales humides. L'amélioration substantielle de la qualité d'ajustement observée dans cette étude (R^2 conditionnel = 0,91 contre 0,52 pour la surface terrière considérée isolément) démontre que la biomasse forestière ne peut être réduite à une simple fonction de la dimension géométrique des arbres. Elle résulte plutôt d'une interaction complexe entre la structure du peuplement, sa composition floristique et les conditions environnementales locales [13].

Cette observation s'avère particulièrement pertinente dans le contexte écologique de la Cuvette centrale congolaise, caractérisée par une mosaïque d'habitats forestiers différenciés. Les contrastes écologiques observés entre les forêts hydromorphes d'Isangi, les plateaux ferrallitiques d'Uma et les formations submontagnardes de Mambasa illustrent l'importance des facteurs contextuels dans la structuration des peuplements et dans la variabilité des stocks de carbone [7]. L'introduction du facteur « site » comme effet aléatoire dans les modèles statistiques permet ainsi de capturer une part importante de la variabilité écologique non directement mesurée, réduisant les biais d'estimation généralement associés aux inventaires forestiers à large échelle [14].

3.2.2 Analyse Comparative et Moteurs Ecologiques de la Biomasse

L'effet déterminant de la surface terrière et de la hauteur moyenne sur la biomasse aérienne observé dans cette étude concorde avec de nombreux travaux menés dans les forêts tropicales d'Afrique et d'Amazonie [6][15]. Ces variables structurales reflètent en effet la dimension volumétrique du bois vivant, constituant ainsi les principaux déterminants biophysiques du stock de carbone forestier. Toutefois, l'un des apports majeurs de cette étude réside dans la mise en évidence du rôle modulateur de la diversité floristique. Bien que son effet direct sur la biomasse demeure modéré, son inclusion dans les modèles améliore sensiblement la précision des estimations. Ce résultat confirme l'hypothèse selon laquelle la complémentarité fonctionnelle entre espèces favorise une occupation plus efficiente des niches écologiques et une meilleure utilisation des ressources disponibles [16][17].

Par ailleurs, l'analyse floristique met en évidence la contribution déterminante de certaines espèces dominantes à forte densité ligneuse dans la dynamique régionale du carbone. La dominance d'espèces telles que *Scorodophloeus zenkeri* dans les forêts hydromorphes d'Isangi ou *Cynometra alexandri* dans les formations plus matures de Mambasa suggère l'existence de taxons structurants capables d'influencer significativement les stocks de biomasse à l'échelle du paysage. Des observations similaires ont été rapportées dans les forêts amazoniennes, où quelques espèces hyperdominantes contrôlent une part substantielle du cycle régional du carbone [18]. L'altitude apparaît également comme un facteur environnemental déterminant dans la structuration des peuplements forestiers. Dans la présente étude, son effet positif sur la biomasse pourrait refléter la présence d'espèces à croissance plus lente mais à densité ligneuse plus élevée dans les formations forestières situées en zone submontagnarde [19].

3.2.3 Implications Pour les Politiques REDD+ et la Gestion Forestière en République Démocratique du Congo

Les résultats obtenus présentent des implications opérationnelles importantes pour la mise en œuvre des politiques climatiques et des stratégies de gestion durable des forêts en République démocratique du Congo. En particulier, l'intégration de variables floristiques et environnementales dans les modèles d'estimation de la biomasse pourrait contribuer à améliorer la précision des systèmes nationaux de suivi, rapportage et vérification (MRV) dans le cadre des mécanismes REDD+ [20]. Une meilleure prise en compte de la variabilité écologique régionale permettrait de réduire l'incertitude associée aux bilans carbone nationaux et d'optimiser l'allocation des financements climatiques internationaux, notamment ceux issus des initiatives telles que la Central African Forest Initiative (CAFI) ou le Forest Carbon Partnership Facility (FCPF). Sur le plan de la gestion forestière, les résultats suggèrent la nécessité d'approches différenciées selon les caractéristiques écologiques des massifs étudiés. Les forêts matures de Mambasa, caractérisées par des stocks élevés de biomasse, devraient ainsi faire l'objet de mesures de protection renforcées. À l'inverse, les zones soumises à une pression anthropique croissante, notamment autour des centres de consommation de bois-énergie comme Isangi, nécessitent le développement de programmes de reboisement et d'aménagement forestier durable [21].

IV. CONCLUSION & RECOMMANDATIONS

4.1 Conclusion

Cette étude démontre que la biomasse aérienne (AGB) dans la Cuvette centrale congolaise est le produit d'une synergie étroite entre la complexité architecturale des peuplements et leur diversité floristique. Nos analyses confirment la supériorité des modèles intégrés (GLMM) qui, en associant la surface terrière à la richesse spécifique, expliquent jusqu'à 82 % à 91 % de la variance de l'AGB, surpassant ainsi les modèles dendrométriques univariés classiques. L'innovation majeure de ce travail réside dans la démonstration que la diversité spécifique agit comme un amplificateur de performance prédictive, particulièrement lorsqu'elle est modulée par des facteurs contextuels tels que l'altitude.

Sur le plan pratique, ces résultats offrent un socle scientifique pour la territorialisation des systèmes de suivi, rapportage et vérification (MRV) en République Démocratique du Congo. Ils prouvent que négliger l'identité taxonomique des essences conduit à une sous-estimation ou à une incertitude préjudiciable à la crédibilité des projets REDD+. Malgré la robustesse de nos modèles, la nature transversale des inventaires limite la compréhension des flux dynamiques à long terme. Il est désormais impératif de passer d'une vision statique à une gestion adaptative de ces écosystèmes, en plaçant l'intégrité écologique au cœur des mécanismes de financement climatique. La pérennité du deuxième puits de carbone mondial dépend de notre capacité à intégrer cette complexité biologique dans les politiques de conservation durable.

4.2 Recommendations

Sur la base des résultats de cette recherche, les recommandations suivantes sont formulées pour les décideurs, les gestionnaires forestiers et la communauté scientifique : Renforcer la collecte de données écologiques et spatiales : Il est essentiel d'intégrer des données à haute résolution, notamment via la télédétection LiDAR et Sentinel-2, pour spatialiser les modèles de biomasse à l'échelle régionale et réduire les incertitudes des bilans carbone nationaux. Intégrer la dynamique temporelle : La mise en place de suivis longitudinaux sur les 60 placettes permanentes est nécessaire pour quantifier les taux réels de mortalité et de recrutement, permettant de modéliser la résilience des massifs face aux pressions anthropiques et au changement climatique.

Favoriser une approche participative : L'implication directe des communautés locales dans les inventaires et la surveillance forestière est indispensable pour garantir l'adhésion aux politiques REDD+ et assurer la transférabilité des modèles de gestion durable. Développer des outils opérationnels de cartographie : Nous préconisons la création de systèmes d'information géographique (SIG) interactifs intégrant les espèces bio-indicatrices identifiées, afin de faciliter la planification spatiale et le zonage des aires protégées. Poursuivre la recherche sur les espèces clés : Il est crucial d'approfondir l'étude des traits fonctionnels des essences dominantes (ex : *Scorodophloeus zenkeri*, *Cynometra alexandri*) qui jouent un rôle structurant dans le stockage du carbone, pour mieux orienter les stratégies de restauration forestière.

REFERENCES

- [1] Pan, Y., Birdsey, R. A., Fang, J., Houghton, R., Kauppi, P. E., Kurz, W. A., ... & Hayes, D. (2011). A large and persistent carbon sink in the world's forests. *science*, 333(6045), 988-993.
- [2] Lewis, S. L., Edwards, D. P., & Galbraith, D. (2015). Increasing human dominance of tropical forests. *Science*, 349, 827–832. <https://doi.org/10.1126/science.aaa9932>
- [3] Dargie, G. C., Lewis, S. L., Lawson, I. T., et al. (2017). Age, extent and carbon storage of the central Congo Basin peatland complex. *Nature*, 542, 86–90. <https://doi.org/10.1038/nature21048>
- [4] Sarre, A. (Ed.). (2020). *Global forest resources assessment 2020: Main report*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- [5] Ali, A., Yan, E. R., Chen, H. Y., Chang, S. X., Zhao, Y. T., Yang, X. D., & Xu, M. S. (2016). Stand structural diversity rather than species diversity enhances aboveground carbon storage in secondary subtropical forests in Eastern China. *Biogeosciences*, 13(16), 4627-4635.
- [6] Chave, J., Réjou-Méchain, M., Búrquez, A., Chidumayo, E., Colgan, M. S., Delitti, W. B., ... & Vieilledent, G. (2014). Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. *Global change biology*, 20(10), 3177-3190.
- [7] De Wasseige, C., Flynn, J., Louppe, D., Hiol, F., & Mayaux, P. (2014). *Les forêts du bassin du Congo-Etat des forêts 2013*. Weyrich.
- [8] Fayolle, A., Swaine, M. D., Bastin, J. F., Bourland, N., Comiskey, J. A., Dauby, G., ... & Plumptre, A. J. (2014). Patterns of tree species composition across tropical African forests. *Journal of Biogeography*, 41(12), 2320-2331.
- [9] Condit, R. (1998). *Tropical forest census plots: methods and results from Barro Colorado Island, Panama and a comparison with other plots*. Springer Science & Business Media.
- [10] Angiosperm Phylogeny Group. (2009). An update of the Angiosperm Phylogeny Group classification for the orders and families of flowering plants: APG III. *Botanical Journal of the Linnean Society*, 161(2), 105-121.
- [11] Chave, J., Réjou-Méchain, M., Búrquez, A., Chidumayo, E., Colgan, M. S., Delitti, W. B., ... & Vieilledent, G. (2014). Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. *Global change biology*, 20(10), 3177-3190.
- [12] Zanne, A. E., López-González, G., Coomes, D. A., Ilic, J., Jansen, S., Lewis, S. L., Miller, R. B., Swenson, N. G., Wiemann, M. C., & Chave, J. (2009). *Global wood density database*. Dryad Digital Repository. <https://hdl.handle.net/10255/dryad.235>



- [13] Dormann, C. F., et al. (2013). Collinearity: A review of methods to deal with it and a simulation study evaluating their performance. *Ecography*, 36, 27–46. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0587.2012.07348>.
- [14] Akaike, H. (1974). A new look at the statistical model identification. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 19(6), 716-723.
- [15] Lewis, S. L., Sonké, B., Sunderland, T., Begne, S. K., Lopez-Gonzalez, G., Van Der Heijden, G. M., ... & Zemagho, L. (2013). Above-ground biomass and structure of 260 African tropical forests. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 368(1625).
- [16] Paquette, A., & Messier, C. (2011). The effect of biodiversity on tree productivity. *Global Ecology and Biogeography*, 20(1), 170–180.
- [17] Ali, A., Yan, E. R., Chen, H. Y., Chang, S. X., Zhao, Y. T., Yang, X. D., & Xu, M. S. (2016). Stand structural diversity rather than species diversity enhances aboveground carbon storage in secondary subtropical forests in Eastern China. *Biogeosciences*, 13(16), 4627-4635.
- [18] Fauset, S., Johnson, M. O., Gloor, M., Baker, T. R., Monteagudo M, A., Brien, R. J., & Phillips, O. L. (2015). Hyperdominance in Amazonian forest carbon cycling. *Nature communications*, 6(1), 6857.
- [19] Cuni-Sanchez, A., et al. (2021). High aboveground carbon stock of African tropical montane forests. *Nature*, 596, 536.
- [20] Tyukavina, A., Hansen, M. C., Potapov, P., Parker, D., Okpa, C., Stehman, S. V., ... & Turubanova, S. (2018). Congo Basin forest loss dominated by increasing smallholder clearing. *Science advances*, 4(11), eaat2993.
- [21] Baccini, A., Walker, W., Carvalho, L., Farina, M., Sulla-Menashe, D., & Houghton, R. A. (2017). Tropical forests are a net carbon source based on aboveground measurements of gain and loss. *Science*, 358(6360), 230-234.