



Analyse de la dynamique des Accroissements en Biomasse aérienne et Séquestration du Carbone des Arbres de la Réserve des biosphère de Luki, RD Congo

Sylvain Ambayi Bienu^{a,d} ; Tolerant K. Lubalega^{b,c} ; Damase P. Khasa^d ; Dieudonné Musibono Eyul'Anki^e, Longa Ndjate Pierrot^a, Franck Lwamba Kahozia^a, Mamie Alice Okoto Washema^a, Mambweni Nginamau Cedrick^a, Pombo Nzinga Blaise^a Eustache Kidikwadi Tango^e et Honoré Belesi Katula^e

- a. Département de géographie et de gestion de l'environnement, Institut Supérieur Pédagogique de Gombe, Kinshasa 01XX, République Démocratique du Congo;
- b. Institut National de Recherches Agronomiques (INERA/Luki), Service de gestion et de conservation des ressources naturelles, Luki, province du Kongo central, République démocratique du Congo;
- c. Université de Kikwit, Faculté des sciences agronomiques, Département des sciences végétales, C.P. 76, Kikwit, République démocratique du Congo;
- d. Chaire de recherche du Canada en génomique forestière et environnementale, Centre de recherche forestière et Institut de biologie intégrative et des systèmes, Université Laval, Québec G1V 0A6, Canada;
- e. Département des sciences de l'environnement, Faculté des sciences, Université de Kinshasa, BP 117, Kinshasa XI 023, République démocratique du Congo;

Résumé

L'analyse de la dynamique des accroissements en biomasse aérienne et de la séquestration du carbone de la Réserve de Luki est cruciale pour comprendre les rôles de celle-ci dans la régulation du climat et la conservation de la biodiversité.

Les données ont été collectées à partir de 15 parcelles permanentes d'un hectare chacune réparties dans trois zones de gestion: Zone centrale, tampon et de transition. Les analyses statistiques de l'ANOVA et les coefficients de corrélation, ont révélé des variations spatiales et temporelles significatives dans la croissance des arbres.

La séquestration du carbone est fortement corrélée au volume des arbres, ce qui indique que la croissance du volume est un indicateur clé de la capacité de stockage du carbone. Ces résultats contribuent à une meilleure compréhension de la dynamique forestière sous les pressions humaines et naturelles, et fournissent des informations pour les stratégies de gestion ciblées visant à optimiser la séquestration du carbone et à renforcer la résilience des forêts.

Mots clés: Accroissement des arbres, biomasse, carbone séquestré, Réserve de biosphère de Luki

Abstract

Analysis of the dynamics of aboveground biomass increments and carbon sequestration in the Luki Reserve is crucial to understand its roles in climate regulation and biodiversity conservation.

Data were collected from 15 permanent plots of one hectare each distributed in three management zones: Core, Buffer and Transition Zone. Statistical analyses of ANOVA and correlation coefficients revealed significant spatial and temporal variations in tree growth.

Carbon sequestration is strongly correlated with tree volume, indicating that volume growth is a key indicator of carbon storage capacity. These results contribute to a better understanding of forest dynamics under human and natural pressures, and provide information for targeted management strategies aimed at optimizing carbon sequestration and enhancing forest resilience.

Key words: Tree increment, biomass, sequestered carbon, Luki Biosphere Reserve

Introduction

La lutte contre le changement climatique est devenue une priorité mondiale, et l'un de ses éléments essentiels réside dans la capacité des écosystèmes forestiers à séquestrer le carbone (GIEC, 2007; IPCC, 2015). Les forêts tropicales, en particulier, jouent un rôle clé dans la régulation du climat mondial en stockant du carbone atmosphérique dans leur biomasse grâce à la réaction de la photosynthèse. Cependant, la déforestation et la dégradation de ces forêts sont des contributeurs majeurs à l'augmentation des gaz à effet de serre, notamment le dioxyde de carbone (CO₂), qui a un impact direct sur le réchauffement climatique. La compréhension des processus de croissance des arbres et de la séquestration du carbone est donc cruciale pour élaborer des stratégies efficaces de conservation et de gestion durable des forêts tropicales (Pan et al., 2011).

L'accroissement de la biomasse aérienne, qui inclut les troncs, les branches et les feuilles des arbres, est un indicateur direct de la capacité des forêts à absorber et à stocker le carbone. Cette biomasse constitue l'un des principaux réservoirs de carbone dans les forêts tropicales. La capacité des arbres à capter le CO₂ via la photosynthèse et à le stocker sous forme de carbone est un processus fondamental pour atténuer les effets du changement climatique, en réduisant la concentration de CO₂ dans l'atmosphère, l'un des principaux gaz responsables du réchauffement global (Chave et al., 2005). Les forêts tropicales, qui stockent environ 50 % du carbone terrestre, jouent ainsi un rôle vital dans la régulation climatique. Cependant, ces écosystèmes sont vulnérables aux perturbations anthropiques, telles que la déforestation et l'exploitation forestière illégale, ainsi qu'aux changements climatiques naturels (Houghton, 2005).

Les études récentes de quantification de CO₂ montrent que les forêts tropicales stockent environ 250 gigatonnes de carbone, ce qui représente près de la moitié des réserves terrestres de carbone. Toutefois, la déforestation dans ces écosystèmes représente environ 10 % des émissions mondiales de CO₂, ce qui souligne l'importance de protéger ces forêts pour maintenir l'équilibre carbone dans l'atmosphère (Houghton, 2005). L'estimation de la biomasse aérienne et de la séquestration du carbone repose principalement sur des modèles allométriques, utilisant des paramètres comme le diamètre à hauteur de poitrine (DHP), la hauteur des arbres et la densité du bois (Chave et al., 2014). Ces modèles sont largement utilisés dans les forêts tropicales, mais leur

précision dépend souvent des spécificités locales, telles que la composition des espèces, les types de forêts et les conditions environnementales. Par exemple, une étude menée dans le bassin du Congo par Lewis et al. (2013) a révélé que les modèles allométriques globaux surestimaient parfois la biomasse dans certaines forêts tropicales denses, ce qui souligne la nécessité d'adapter ces modèles aux conditions locales, notamment, en Afrique centrale.

La Réserve de Biosphère de Luki, située en République Démocratique du Congo (RDC), représente un site d'étude idéal pour examiner ces processus. En tant que l'une des dernières poches de forêts tropicales humides dans la région, la réserve joue un rôle crucial dans la conservation du carbone et de la biodiversité. Toutefois, les pressions anthropiques, telles que l'agriculture, l'exploitation forestière et la collecte de bois, menacent cet écosystème. Peu d'études ont été menées sur la dynamique de la biomasse et du carbone dans cette réserve, bien que des recherches dans des zones similaires montrent que les forêts secondaires, présentes dans les zones perturbées, ont un fort potentiel de séquestration de carbone, notamment au cours des premières phases de leur régénération (Lubalega, 2016; Poorter et al., 2016; Lubalega et al., 2018). Les forêts matures, malgré une croissance plus lente, constituent des réservoirs de carbone stables à long terme (Brown et al., 1997).

Dans ce contexte, l'étude de l'accroissement en biomasse aérienne et de la séquestration du carbone dans la Réserve de Luki est cruciale pour évaluer l'impact des pressions anthropiques en vue de proposer des mesures de gestion durables; cette étude constitue une opportunité d'avoir une base de données fiable pour orienter les décideurs, les gestionnaires et les chercheurs sur la réalité de terrain. Cette analyse permettrait de mieux comprendre la réponse des forêts tropicales aux changements environnementaux et aux activités humaines, fournissant ainsi des informations essentielles pour maximiser les bénéfices en matière de séquestration du carbone et de conservation de la biodiversité. En optimisant la gestion forestière, il est possible de renforcer le rôle des forêts de Luki en tant que puits de carbone, contribuant ainsi à l'atténuation du changement climatique.

Cette étude vise à analyser les accroissements en biomasse aérienne en rapport avec la séquestration du carbone des arbres dans la Réserve de Biosphère de Luki, avec pour objectif de comprendre leur rôle dans la lutte contre le changement climatique et leur contribution à la conservation des écosystèmes forestiers tropicaux. Plus spécifiquement, elle se fixe pour objectifs de : (i) quantifier les accroissements annuels en biomasse aérienne des arbres dans différentes zones de la réserve en utilisant des méthodes allométriques adaptées aux conditions locales ; (ii) évaluer la séquestration annuelle de carbone dans ces forêts et estimer leur contribution à la réduction des émissions de CO₂ ; (iii) analyser la répartition spatiale de la croissance des arbres selon les types de forêts (forêts secondaires, forêts matures, zones perturbées) et les zones de gestion ; (iv) proposer des stratégies de gestion et de conservation pour maximiser la séquestration du carbone et préserver la biodiversité dans la Réserve de Luki. Pour y parvenir les hypothèses suivantes ont été vérifiées: (a) les trois zones de la RBL présente aient une richesse et diversité spécifiques différente d'une zone à une autre; (b) les activités anthropiques affecteraient les attributs de la forêt semi-décidue en lien avec leur gain de biomasse annuelle.

Méthodologie

Zone d'étude

Les données des accroissements d'arbres ont été recueillies dans la Réserve de biosphère de Luki, située dans le sud-ouest de la République démocratique du Congo (RDC) (latitude -05.62150° S, longitude 013.09819° E, altitude ~ 300 m au-dessus du niveau de la mer), à environ 120 km à l'est de la côte atlantique (Figure 1). Le RBL est un vestige de la végétation forestière du Mayombe (Lubini, 1997), classé comme climat tropical humide (Aw5) selon la classification de Köppen (1931) (Peel et al., 2007). La pluviométrie annuelle moyenne varie de 1150 à 1500 mm (Lubalega et 2021), et la température moyenne annuelle est comprise entre 25°C et 30°C . Les sols de la RBL sont généralement ferrallitiques (feralsols) et acides, caractérisés par une faible teneur en cations. Malgré sa désignation en tant qu'aire protégée, les ressources naturelles de la RBL font face à d'importantes pressions anthropiques. Ces pressions proviennent principalement d'activités locales telles que les pratiques agricoles de culture sur brûlis, la collecte de bois énergie, les feux de brousse, la récolte de bois de chauffage et l'exploitation forestière illégale (Omeno et al., 2021). Compte tenu de la dynamique forestière et de l'impact des activités humaines, les zones d'inventaire ont été sélectionnées en fonction du zonage à la RBL. Les placettes ont été localisées au hasard dans des forêts presque intactes de la zone centrale, des forêts secondaires matures dans la zone tampon et dans les jeunes forêts secondaires dans la zone de transition (Figure. 1).

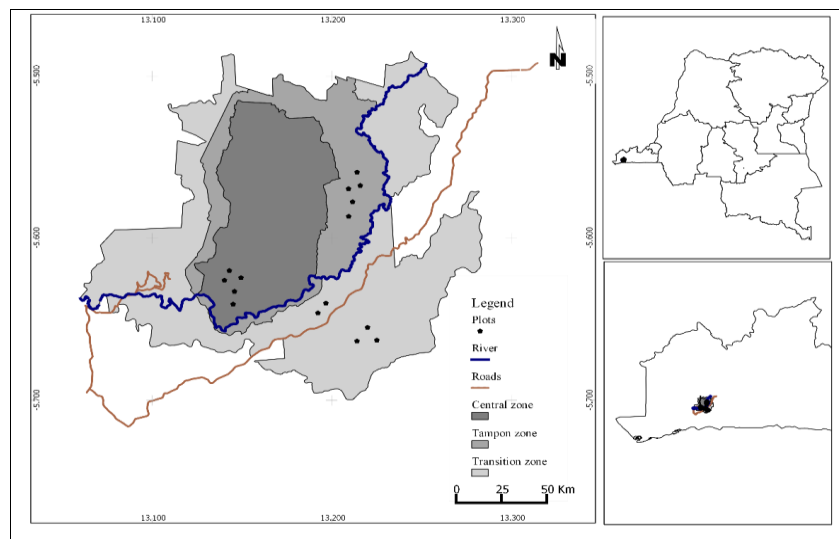


Figure n° 1. Carte de la zone d'étude indiquant les parcelles inventoriées au sein de la Réserve de Biosphère de Luki (points noirs à l'intérieur du polygone). La carte a été créée à l'aide du logiciel QGIS (www.qgis.org/nl/).

Dispositif expérimental et collecte de données

Les accroissements d'arbres ont été mesurés sur des arbres sur pied dans des parcelles permanentes au sein de la réserve de biosphère de Luki, conformément au plan de zonage établi depuis 1997. Ce plan comprend la zone centrale, la zone tampon et la zone de transition, conçues pour limiter la pression anthropique principalement sur les zones de transition et tampon tout en favorisant la conservation et la recherche dans la zone centrale (Ilondea, 2021). Afin de prendre en compte toute la variabilité floristique, les inventaires floristiques et dendrométriques ont eu lieu au sein des parcelles qui ont été répliquées 5 fois dans chaque zone et installées au hasard dans chaque zone, ce qui a donné un total de 15 parcelles de 1 ha chacune (figure 1). En raison de la complexité de la strate arbustive inférieure dans les forêts tropicales primaires et secondaires, qui peut obscurcir l'identification des espèces d'arbres parmi les herbes hautes, les lianes et les arbustes (Hartshorn et Hammel, 1994), seuls les troncs d'arbres individuels d'un diamètre minimum à hauteur de poitrine (dhp) de 10 cm ont été pris en compte (Picard et al., 2015). Le protocole international normalisé d'inventaire des forêts tropicales proposé par RAINFOR (Phillips et al., 2010) a été appliqué pour assurer la compatibilité et la comparabilité des données avec d'autres inventaires planétaires. Dans chaque placette, tous les arbres pris en compte sont ceux ayant un dhp de 10 cm ou plus ($\text{dhp} \geq 10 \text{ cm}$) après mesurage et identification. Les mesures de circonférence ont été prises à l'aide d'un dbh mètre (fabricant YIQH, Shanghai, Chine) à 1,30 m au-dessus du sol ou à 10 cm au-dessus des contreforts ou des racines sur pilotis, tandis que la hauteur des arbres a été mesurée à l'aide d'un laser Vertex (Vertex 5, haglofsweden.com). Étant donnée les nombreuses imprécisions dans la mesure de la hauteur des arbres (en raison de faible visibilité de la canopée, de non respect de la distance horizontale lors du mesurage), seules les données de diamètre ont été utilisées pour déterminer l'accroissement annuel moyen des arbres. Les arbres à plusieurs troncs ont été comptés comme un seul arbre si les branches étaient au dessus de 1,30 mètre, et comme plusieurs troncs si les branches étaient en dessous de 1,30 mètre.

Afin d'étudier la dynamique forestière suivant le zonage dans la réserve de biosphère de Luki, les croisements des arbres ont été estimés ou calculer sur la base de l'augmentation du diamètre et de la surface terrière (m^2/ha). Ces augmentations ont été calculées à l'aide des données de mesure dendrométriques cumulatives de quatre campagnes de relevés effectuées pour des espèces d'arbres individuels lors de la première campagne de relevés (juin 2019). L'augmentation annuelle du diamètre a été calculée en soustrayant la valeur initiale de la valeur finale: $(t_n) - (t_0)$, où t_n est la dernière mesure du dhp (juin 2020) et t_0 est la mesure initiale à l'instant t_0 (juin 2019).

Les augmentations de la surface terrière et des autres paramètres ont également suivi la même méthode de calcul entre la dernière mesure et la première mesure. Des augmentations négatives ont été enregistrées pour certaines espèces dans les différentes campagnes. Dans le passé, plusieurs raisons ont été avancées pour expliquer les augmentations négatives, telles que la perte d'écorce chez les espèces des qu'amantes, la rétraction de l'écorce due à des facteurs environnementaux (agents pathogènes, déficit hydrique, etc.) et des erreurs dans les mesures.

Selon Phillips et Gentry (1994), Condit et al. (1995) et Sheil (1995), la marge d'erreur acceptable pour les augmentations négatives du diamètre de l'arbre se situe entre 0 et -2 mm. Dans l'analyse, ces augmentations négatives ont été remplacées par zéro dans les limites acceptables. Les taux de recrutement et de mortalité périodiques ont été calculés pour toutes les zones sur l'ensemble de la période d'observation.

Les recrues, c'est-à-dire, les souches qui ont récemment atteint le seuil de recrutement lors de la nouvelle campagne de collecte de données, ont été comptées et ont permis de calculer le taux de recrutement à partir du nombre total de souches mesurées au cours de la dernière année par rapport à la première année, multiplié par 100.

Le taux de mortalité a été calculé en comptant les souches mortes de l'année précédente par rapport aux souches mesurées la première année et en multipliant par 100. Comme le taux de mortalité ne dépassait pas les taux de recrutement (nombre d'individus ayant atteint une taille mesurable), nous l'avons tout simplement négligé dans l'analyse. Le diamètre moyen et l'accroissement de la surface terrière ont été calculés pour chaque combinaison d'espèces et de zones pour une année donnée. Les intervalles de confiance pour l'accroissement du diamètre moyen ont été calculés en supposant une distribution normale des observations.

Cette hypothèse n'était pas valable pour tous les échantillons; Cependant, les intervalles de confiance ont été principalement utilisés à des fins d'illustration. La région de Luki faisant partie des zones de basse altitude (altitude inférieure à 600 m), couverte des forêts humides (précipitation entre 1500 et 3500 mm/an) les bases mathématiques des équations allométriques développées par Chave et al. (2014) et confirmées par Fayolle et al. (2016) ont été utilisées pour estimer la biomasse ligneuse aérienne (t/ha) sur base de données dendrométriques collectées sur les diamètres. Les accroissements en volume, en biomasse et en séquestration de carbone des arbres individuels des espèces inventoriées dans les trois zones ont été calculés par les formules suivantes:

$$Ba = \left[\rho \times e \right]^T (-1.499 + 2.148 + \ln(D) + 0.207 \times (\ln(D))^2 - 0.0281 \times (\ln(D))^3)$$

(Fayolle et al., 2013)

Avec Ba: biomasse aeriennne, ρ (gr/cm³) et D (en cm) la densite specifique et le diameter respectivement

$$AA_vol = V1 - V0, V = D^2/1000$$

$$AA_BA = Ba_1 - Ba_0$$

$$AA_Co2_Seq = Q_{CO_2(t)} - Q_{CO_2(0)} \quad Q_{CO_2} = \tau_c \times Ba \times \frac{44}{12}$$

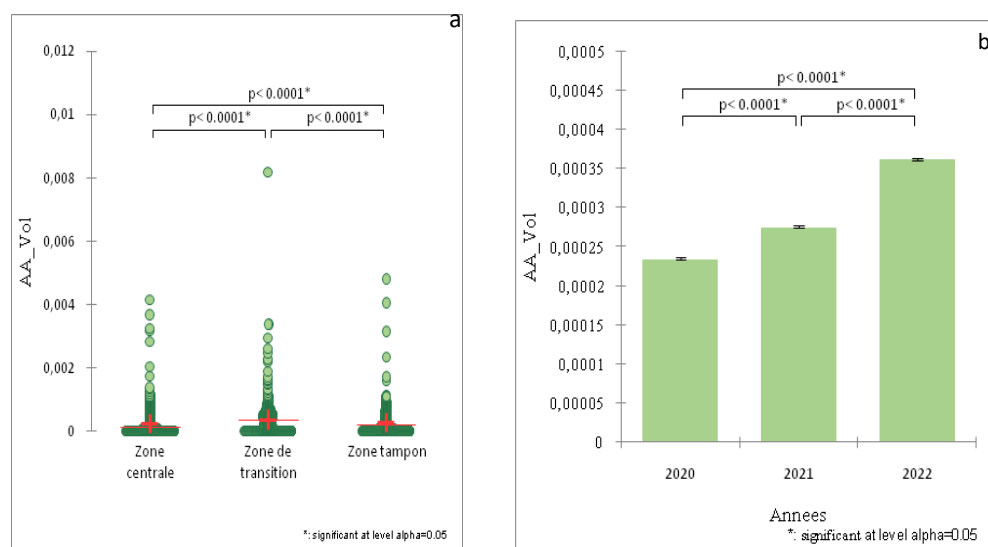
Analyse des données

L'analyse de la variance des accroissements annuels en diamètre à hauteur de poitrine (DHP) et en surface terrière (m²/ha) pour les différentes espèces mesurées dans les trois zones de la Réserve de biosphère de Luki a été réalisée à l'aide du logiciel R, en suivant les méthodes proposées par Casgrain et Legendre (2000). Le modèle mathématique utilisé pour cette analyse ANOVA est représenté par l'équation:

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \alpha\beta_{ij} + \epsilon_{ijk}$$

ou, Y_{ijk} était la valeur mesurée observée d'un k arbres individuels donnés de l'espèce i poussant dans la zone j ; μ était la valeur moyenne globale; α_i était l'effet de l'espèce i ; β_j était l'effet de la zone j , $\alpha\beta_{ij}$ était l'effet de l'interaction de l'espèce i et de la zone j et ϵ_{ijk} était l'erreur aléatoire. L'homogénéité des variances des résidus a été testée pour une tendance normale avant l'analyse ANOVA. Avant de procéder à l'ANOVA, un test d'homogénéité des variances des résidus a été effectué pour vérifier la normalité des données. Ce test est crucial pour s'assurer que les hypothèses de l'ANOVA sont respectées, notamment la distribution normale des résidus et l'égalité des variances à travers les différents groupes (Zar, 1999). L'analyse de la variance a permis de déterminer l'importance relative des effets des espèces, des zones et de leurs interactions sur les accroissements en diamètre, surface terrière, en biomasse aérienne, et en séquestration du carbone fournissant des informations clés sur la dynamique de croissance dans la réserve. Ces analyses sont essentielles pour adapter les stratégies de gestion forestière, en tenant compte des spécificités écologiques et de la variabilité interspécifique en termes de croissance et de séquestration de carbone (Sokal & Rohlf, 1995).

Résultats



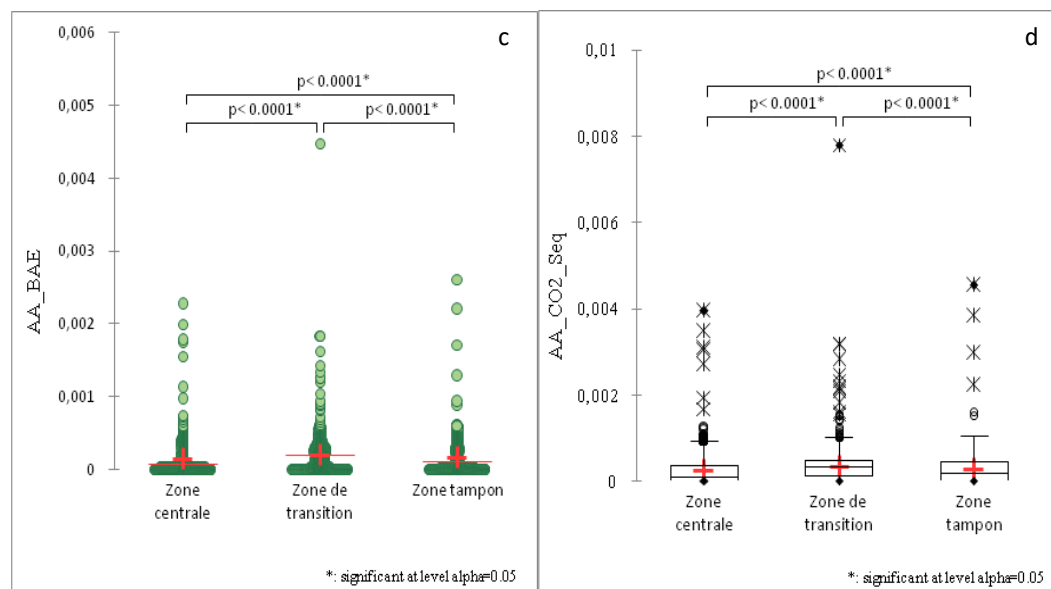


Figure n° 2. Comparaison des moyennes des accroissements en volume de la matière ligneuse par zones (a), et par année (b) accroissements en biomasse aérienne (c) et du carbone séquestré (d) dans la Réserve de biosphère de Luki.

Les résultats de cette étude révèlent que les espèces d'arbres de la Réserve de biosphère de Luki réagissent fortement aux variations environnementales, entraînant des augmentations significatives de la biomasse, du volume et de la séquestration du carbone. Les différences observées entre les zones mettent en évidence l'importance de prendre en compte les conditions spécifiques de chaque zone dans les stratégies de conservation et de gestion.

En particulier, les zones qui favorisent une meilleure croissance doivent être priorisées, car elles maximisent les bénéfices en matière de séquestration du carbone. La corrélation étroite entre les paramètres de croissance, tels que le volume, la biomasse et la séquestration du carbone, souligne l'interdépendance de ces processus. Cela renforce le rôle crucial des forêts tropicales en tant que puits de carbone dans l'atténuation des changements climatiques. Comme l'ont noté Pan et al. (2011), les forêts tropicales représentent une composante clé dans la capture et le stockage du carbone, et leur gestion adéquate est essentielle pour maintenir ce rôle à long terme. De plus, Bonan (2008) rappelle que la préservation des forêts et l'augmentation de leur capacité de stockage de carbone peuvent contribuer de manière significative à la lutte contre les effets du changement climatique.

Ainsi, des stratégies de conservation spécifiques aux zones, axées sur les zones à fort potentiel de croissance, sont essentielles pour optimiser la séquestration du carbone. La gestion différenciée des forêts, prenant en compte les conditions écologiques locales, pourrait ainsi maximiser leur rôle en tant que puits de carbone, contribuant à atténuer les impacts du réchauffement climatique à l'échelle mondiale.

Dynamiques spatiales et temporelles

Les valeurs des accroissements dans les trois zones sur les trois intervalles de temps de 4 ans de campagne de mesures mettent en évidence les augmentations moyennes du volume, de la biomasse et de la séquestration du carbone selon les zones et les années. Les résultats révèlent une variation spatiale marquée des taux de croissance, la zone de transition et la zone tampon enregistrant des augmentations plus importantes en volume et en biomasse que la zone centrale. Ces différences spatiales peuvent être attribuées à des facteurs environnementaux tels que la fertilité des sols, la disponibilité en eau et la disponibilité des éléments minéraux, soutenant l'idée que les conditions locales jouent un rôle crucial dans le développement des forêts.

Les fluctuations observées au niveau temporel montrent que les taux de croissance ont varié au fil des années, avec certaines périodes marquant des hausses plus significatives que d'autres. Cela suggère que les dynamiques climatiques ou des événements spécifiques à certaines années ont pu influencer ces augmentations. Comme l'ont noté Smit et al. (2009), la croissance des forêts est fortement affectée par les conditions environnementales locales, ce qui explique en partie ces variations spatiales et temporelles. La prise en compte de ces facteurs dans les stratégies de gestion forestière permettrait de mieux anticiper les changements dans la capacité des forêts à séquestrer le carbone et à maintenir une biomasse saine. Ces résultats appuient également les conclusions de Chave et al. (2005), qui ont souligné que la productivité (production de la matière ligneuse) des forêts tropicales dépend largement des interactions entre les espèces, le climat et les propriétés des sols. Ainsi, une gestion différenciée en fonction des spécificités écologiques des zones pourrait maximiser les gains en volume et en biomasse, et optimiser la séquestration du carbone dans les forêts tropicales.

Modèles des accroissements spécifiques à l'échelle de l'espèce

La variabilité de la croissance en diamètre et en surface terrière observée parmi les différentes espèces d'arbres met en évidence des réponses différenciées aux conditions environnementales. Certaines espèces, particulièrement celles bien adaptées au climat local, enregistrent des augmentations significatives en diamètre et en surface terrière, tandis que d'autres montrent une croissance plus modérée. Cette diversité de réponses souligne l'importance de choisir les espèces adaptées pour les efforts de reboisement et de conservation.

En effet, certaines espèces sont mieux adaptées aux contraintes environnementales spécifiques d'une région, leur permettant de croître plus efficacement, comme le montrent Poorter et al. (2015) dans leurs recherches sur la plasticité fonctionnelle des espèces d'arbres. Cela a des implications pratiques pour les stratégies de gestion forestière, car il est essentiel de sélectionner des espèces capables de maximiser la séquestration du carbone et la résilience des écosystèmes dans un contexte de changement climatique.

Une approche qui tient compte de cette variabilité interspécifique permettrait de renforcer la durabilité des forêts restaurées, en assurant une meilleure adaptation aux conditions locales et une résilience accrue face aux perturbations environnementales. Les recherches de Poorter et al. (2015) ont également montré que les espèces avec une plus

grande plasticité fonctionnelle, c'est-à-dire celles qui peuvent ajuster leur croissance en réponse aux variations de l'environnement, sont plus susceptibles de prospérer dans des conditions changeantes. Cela confirme l'importance de la sélection d'espèces résilientes dans les projets de reforestation. Dans la Réserve de Biosphère de Luki, ces considérations doivent être prises en compte pour maximiser les résultats en termes de croissance forestière et de séquestration du carbone.

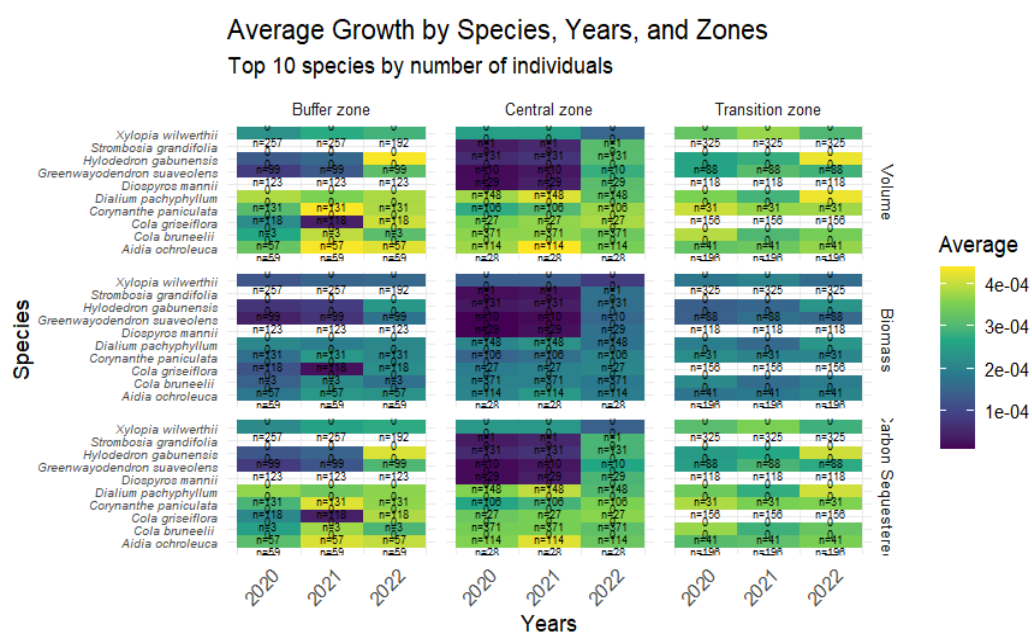


Figure n°3. Valeurs moyennes des accroissements du diamètre de l'arbre (a) et de la surface terrière (b) des 10 premières espèces ayant le nombre d'individus le plus élevé suivant le zonage dans la Réserve de biosphère de Luki. L'intensité de la couleur montre indique la variation des valeurs des accroissements observés sur les différentes espèces sur les quatre ans d'observation.

Analyse de la variance (ANOVA)

Les résultats de l'ANOVA montrent que tous les facteurs analysés, à savoir les espèces, les zones et les années, ont des effets significatifs sur les variables de l'accroissement des arbres étudiées dans la Réserve de biosphère de Luki. Les années présentent systématiquement les valeurs F les plus élevées et les niveaux de significativité les plus forts sur toutes les variables (AA_DHP, AA_ST, AA_Vol, AA_BAE et AA_CO2_Seq). Cela suggère que les changements temporels sont le facteur le plus influent sur l'accroissement des arbres, en particulier sur la séquestration du carbone.

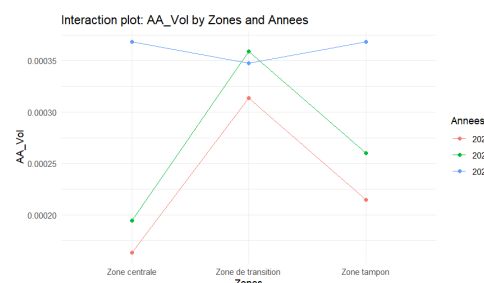
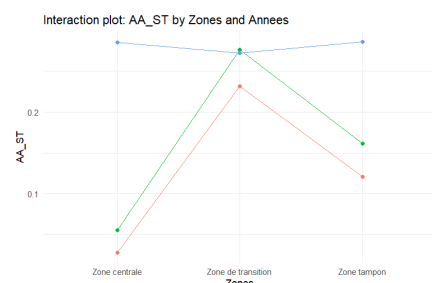
D'après Bonan (2008), les processus de croissance des arbres sont fortement influencés par les fluctuations annuelles, possiblement en raison de variations climatiques ou de perturbations environnementales. Par exemple; pour l'accroissement annuel en diamètre

à hauteur de poitrine (AA_DHP), l'effet des années a un F-value de 1213.5280, ce qui montre une influence très marquée par rapport aux autres facteurs.

Cette tendance est observée également pour les autres variables. Les zones montrent également des effets significatifs, en particulier pour les variables AA_DHP (F-value = 214.3640) et AA_ST (F-value = 395.0592). Cela met en évidence l'importance de la variation spatiale dans la croissance des arbres. Les conditions écologiques, telles que la fertilité des sols, la disponibilité en eau et d'autres facteurs environnementaux, varient entre les zones, ce qui influence directement la dynamique de croissance et la capacité de séquestration du carbone des arbres (Chave et al., 2005).

Bien que l'effet des espèces soit significatif sur toutes les variables étudiées, avec des valeurs F notables (par exemple, pour AA_DHP, F-value = 9.6701), celles-ci sont généralement inférieures à celles des années et des zones. Cela indique que les différences entre espèces jouent un rôle dans les processus de croissance et de séquestration du carbone des peuplements forestiers, mais que ces différences sont souvent moins marquées que les variations temporelles et spatiales (Pan, Yet al., 2011). Les espèces présentent donc une certaine plasticité dans leur réponse aux conditions environnementales, mais ce sont les changements d'années et de zones qui semblent dicter les tendances les plus fortes dans la réserve de biosphère de Luki.

Variables	Source de variation	Sum Sq	Df	F value Pr(>F)
AA_DHP	Espèces	139.97	208	9.6701 < 2.2e-16 ***
	Zones	29.83	2	214.3640 < 2.2e-16 ***
	Années	84.45	2	1213.5280 < 2.2e-16 ***
AA_ST	Espèces	27.66	208	4.3634 < 2.2e-16 ***
	Zones	24.08	2	395.0592 < 2.2e-16 ***
	Années	72.91	2	2392.3765 < 2.2e-16 ***
AA_Vol	Espèces	0.00011402	208	7.2003 < 2.2e-16 ***
	Zones	0.00001470	2	96.5295 < 2.2e-16 ***
	Années	0.00005244	2	688.7309 < 2.2e-16 ***
AA_BAE	Espèces	0.00003399	208	7.2002 < 2.2e-16 ***
	Zones	0.00000438	2	96.5246 < 2.2e-16 ***
	Années	0.00001563	2	688.7214 < 2.2e-16 ***
AA_CO2_Seq	Espèces	0.00010312	208	7.2004 < 2.2e-16 ***
	Zones	0.00001329	2	96.5349 < 2.2e-16 ***
	Années	0.00004742	2	688.7229 < 2.2e-16 ***



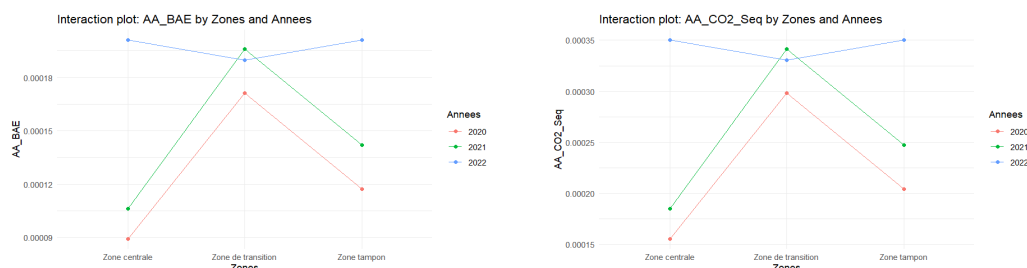


Figure 4 Allure des accroissements en surface terrier, en volume, biomasse aérienne et en séquestration du carbone dans les trois zone sur les trois intervalles de 4 ans de campagne de mesurage.

Analyse de corrélation

Les coefficients de corrélation entre les paramètres étudiés, notamment les augmentations annuelles du diamètre, du volume et de la séquestration du carbone, révèlent des relations positives très fortes. En particulier, la corrélation parfaite entre la séquestration annuelle de CO₂ (AA_CO₂_Seq) et le volume (AA_Vol), avec un coefficient de 1, indiquant que l'augmentation du volume des arbres est directement proportionnelle à des niveaux accrus de séquestration du carbone. Cela signifie qu'à mesure que les arbres augmentent en volume, leur capacité à stocker du carbone augmente également. De plus, les corrélations élevées entre l'augmentation de la biomasse et le volume confirment que la croissance des arbres entraîne automatiquement une augmentation de la biomasse et, par conséquent, une plus grande séquestration du carbone. Ces résultats sont en accord avec des recherches antérieures, comme celles de Forrester et al. (2014), qui mettent également en évidence l'interdépendance entre les paramètres de croissance des arbres, tels que le diamètre, la biomasse et la séquestration du carbone. Forrester et al. (2014) ont montré que l'accumulation de biomasse dans les forêts est directement liée à la capacité de ces écosystèmes à séquestrer du carbone, et que ces relations sont cohérentes à travers diverses espèces et types de forêts. Ainsi, ces corrélations renforcent l'idée que la gestion durable des forêts, en particulier à travers des interventions favorisant la croissance et le volume des arbres, peut jouer un rôle crucial dans l'atténuation des changements climatiques grâce à une séquestration accrue du carbone.

Tableau 1. Coefficient de corrélation au dessus de la diagonal et degré de signification en dessous de la diagonal entre les paramètres étudiés

Variables	AA_DHP	AA_CO2_Seq	AA_Vol	AA_BAE	AA_ST
AA_DHP	1	0.889	0.889	0.889	0.397
AA_CO2_Seq	< 0.0001	1	1.000	1.000	0.375
AA_Vol	< 0.0001	< 0.0001	1	1.000	0.375
AA_BAE	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	1	0.375
AA_ST	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	1

Remarque: AA_DHP représente l'accroissement annuel en diamètre, AA_Vol l'accroissement annuel en volume, AA_ST l'accroissement annuel en surface terrière, AA_BAE l'accroissement annuel en biomasse aérienne, AA_CO2_Seq. l'accroissement annuel en carbone séquestre.

Conclusion

Les résultats de l'étude menée sont en accord avec nos hypothèses du départ et démontrent que les arbres de la réserve de biosphère de Luki présentent un accroissement significative en diamètre, en volume et en biomasse, avec de fortes corrélations positives entre ces paramètres et la séquestration du carbone. Les variations temporelles, en particulier les effets des différentes années, se sont avérées être les facteurs les plus influents affectant l'accroissement des arbres, soulignant l'importance des conditions climatiques dans la dynamique forestière.

Les variations spatiales entre les différentes zones de gestion jouent également un rôle crucial, la zone de transition présentant un potentiel de croissance plus élevé. Cela souligne la nécessité de stratégies de conservation spécifiques à chaque zone pour maximiser les avantages de la séquestration du carbone. Les réponses de croissance spécifiques aux espèces suggèrent que certaines espèces sont mieux adaptées aux conditions environnementales locales, ce qui renforce la nécessité d'une sélection minutieuse des espèces dans les programmes de reboisement. Alors que la réserve de biosphère de Luki continue de faire face aux pressions exercées par les activités humaines, il est essentiel de comprendre la dynamique de croissance et le potentiel de séquestration du carbone de ses forêts pour développer des pratiques de gestion durable. En priorisant les zones à fort potentiel de croissance et en veillant à l'utilisation d'espèces résilientes, contribuera à améliorer la capacité de stockage du carbone de la réserve et à contribuer aux efforts mondiaux visant à atténuer les changements climatiques.

Références

- Bonan, G. B., 2008; Forests and climate change: forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests. *Science*, 320(5882), 1444-1449.
<https://doi.org/10.1126/science.1155121>
- Brown, S., Gillespie, A. J. R., & Lugo, A. E., 1997; Biomass of tropical forests of south and southeast Asia. *Canadian Journal of Forest Research*, 27(3), 785-795.
- Casgrain, P., & Legendre, P., 2000; The R Package for multivariate and spatial analysis. *R Documentation*.
- Chave, J., Andalo, C., Brown, S., Cairns, M. A., Chambers, J. Q., Eamus, D., ... & Yamakura, T., 2005; Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. *Oecologia*, 145(1), 87-99.
<https://doi.org/10.1007/s00442-005-0100-x>
- Chave, J., Rejou-Mechain, M., Burquez, A., Chidumayo, E., Colgan, M. S., Delitti, W. B. C., ... & Vieilledent, G., 2014; Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. *Global Change Biology*, 20(10), 3177-3190.

- Condit, R., Hubbell, S. P., & Foster, R. B., 1995; Mortality rates of 205 Neotropical tree and shrub species and the impact of a severe drought. *Ecological Monographs*, 65(4), 419-439.
- Fayolle, A., Doucet, J. L., Gillet, J. F., Bourland, N., & Lejeune, P., 2016 ; Tree allometry in Central Africa: Testing the validity of pantropical multi-species allometric equations for estimating biomass and carbon stocks. *Forest Ecology and Management*, 305, 29-37.
- Forrester, D. I., Bauhus, J., & Cowie, A. L., 2014; Mixed-species plantations of Eucalyptus with nitrogen-fixing trees: A review. *Forest Ecology and Management*, 233(1), 195-210.
- GIEC, 2007 ; Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [Équipe de rédaction principale, Pachauri R.K., et Reisinger A., (publié sous la direction de-)]. GIEC, Genève, Suisse, 103 pp.
- Hartshorn, G. S., & Hammel, B. E., 1994; Vegetation types and floristic patterns. *La Selva: Ecology and natural history of a neotropical rain forest*, 73-89.
- Houghton, R. A., 2005; Aboveground forest biomass and the global carbon balance. *Global Change Biology*, 11(6), 945-958.
- Houghton, R. A., 2005; Tropical deforestation as a source of greenhouse gas emissions. *Tropical deforestation and climate change*, 13-22.
- Ilondeba, B., 2021; *Gestion durable des ressources forestières dans la Réserve de Biosphère de Luki, RDC*. *Revue Africaine des Sciences de l'Environnement*, 15, 123-132.
- IPCC, 2015; Meeting Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Expert Meeting on Climate Change, Food, and Agriculture [Mastrandrea M.D., Mach K.J., Barros V.R., Bilir T.E., Dokken D.J., Edenhofer O., Field C.B., Hiraishi T., Kadner S., Krug T., Minx J.C., Pichs-Madruga R., Plattner G.-K., Qin D., Sokona Y., Stocker T.F., Tignor M. (eds.)]. World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, 68 pp.
- Lewis, S. L., Sonké, B., Sunderland, T., Begne, S. K., Lopez-Gonzalez, G., Van Der Heijden, G. M., ... & Affum-Baffoe, K., 2013; Above-ground biomass and structure of 260 African tropical forests. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 368(1625), 20120295.
- Lubalega et al., 2021; Lubalega et al., 2018; Carbon sequestration in trees and soil in natural and assisted reforestation on the Ibi village bateke plateau, Democratic Republic of the Congo, *Revue Africaine d'Environnement et d'Agriculture* 1(2), 14-20, depot legal: JL3.01807-57259.
- Lubalega, T.K., Gbawe, V., KHASA, D.P., RUELE, J.C. and LEJOLY, J., 2017; Forest Regeneration of the Bateke Plateau Savannas from Acacia Auriculiformis Plantations in the Democratic Republic of the Congo. *Forest*, 13(9), pp.21-30.
- Opelele Omeno, M., Yu, Y., Fan, W., Lubalega, T., Chen, C., Kachaka Sudi Kaiko, C., 2021; Analysis of the impact of land-use/land-cover change on land-surface temperature in the villages within the luki biosphere reserve. *Sustainability* 13 (20), 11242. <https://doi.org/10.3390/su132011242>.

- 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. <https://doi.org/10.1126/science.1201609>
- Phillips, O. L., & Gentry, A. H., 1994; Increasing turnover through time in tropical forests. *Science*, 263 (5149), 954-958.
- Phillips, O. L., Malhi, Y., Higuchi, N., Laurance, W. F., Núñez, P. V., Vásquez, R. M., ... & Grace, J., 2010; Changes in the carbon balance of tropical forests: Evidence from long-term plots. *Science*, 282(5388), 439-442.
- Picard, N., Saint-André, L., & Henry, M., 2015; Manual for building tree volume and biomass allometric equations: from field measurement to prediction. *Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO)*.
- Poorter, L., Bongers, F., Aide, T. M., Almeyda Zambrano, A. M., Balvanera, P., Becknell, J. M., ... & Mesquita, R. C. G., 2016; Biomass resilience of Neotropical secondary forests. *Nature*, 530(7589), 211-214.
- Poorter, L., Wright, S. J., Paz, H., Ackerly, D. D., Condit, R., Ibarra-Manríquez, G., ... & Wright, I. J., 2015; Functional traits explain variation in tropical tree species' growth rates. *Nature*, 432(7014), 211-214.
- Smit, B., Burton, I., Klein, R. J., & Street, R., 2009; The science of adaptation: a framework for assessment. *Mitigation and adaptation strategies for global change*, 4(3-4), 199-213.
- Sokal, R. R., & Rohlf, F. J., 1995; *Biometry: The principles and practice of statistics in biological research*. W. H. Freeman.
- Zar, J. H., 1999; *Biostatistical analysis*. Pearson Education India.