

RAPPORT COMPLET : ANALYSE DE LA RELATION ENTRE STRUCTURE VERTICALE FORESTIÈRE ET DENSITÉ DU BOIS

- **TABLE DES MATIÈRES**

1. [Introduction et contexte](#)
2. [Données et ressources disponibles](#)
3. [Évolution de l'approche analytique](#)
4. [Méthodologies avancées](#)
5. [Résultats principaux](#)
6. [Interprétation écologique](#)
7. [Classification fonctionnelle](#)
8. [Perspectives pour l'échelle régionale](#)
9. [Recommandations pour la poursuite des analyses](#)
10. [Références et ressources](#)

1. INTRODUCTION ET CONTEXTE

Cette étude vise à comprendre la relation entre la structure verticale des forêts tropicales et la densité du bois (WD) des espèces dominantes. Le projet s'inscrit dans le domaine de l'écologie forestière tropicale, utilisant des données LiDAR pour caractériser la distribution des trouées dans la canopée. L'approche initiale consistait à calculer une simple proportion de trouées à différentes hauteurs, mais a évolué vers une caractérisation multidimensionnelle beaucoup plus sophistiquée.

L'objectif central est d'identifier comment les propriétés fonctionnelles des espèces dominantes (notamment la densité du bois) façonnent l'architecture tridimensionnelle des forêts tropicales,

et d'exploiter ces relations pour développer des méthodes de cartographie des propriétés fonctionnelles à grande échelle.

2. DONNÉES ET RESSOURCES DISPONIBLES

2.1. Données principales

- **Modèles de hauteur de canopée (CHM)** : Dérivés de données LiDAR à haute résolution
- **Inventaires forestiers** : Mesures de tous les arbres ($DBH > 10$ cm) pour chaque placette
- **Densité du bois (WD)** : Valeurs moyennes pour chaque placette
- **Mesures de proportion de trouées** : Calculées à différentes hauteurs (0 à 60m, par 1m) et avec différents buffer (0m, 20m, 50m, 100m, 200m)

2.2. Ressources complémentaires

- **Base de données CoforTraits** : Traits fonctionnels des espèces d'arbres d'Afrique centrale
- **Données environnementales** : Topographie (DEM), données satellitaires optiques
- **Couverture LiDAR régionale** : 500 000 ha de CHM en RDC selon un échantillonnage systématique aléatoire

3. ÉVOLUTION DE L'APPROCHE ANALYTIQUE

3.1. Approche initiale

- Calcul simple de la proportion de pixels considérés comme des trouées à différentes hauteurs
- Utilisation d'un seuil de hauteur pour classer les pixels (trouée vs non-trouée)
- Exploration de métriques basiques: h10, h25, h50, h75, h90, AUC

3.2. Développement intermédiaire

- Modélisation par fonction logistique pour caractériser la forme sigmoïde des courbes

- Extraction des paramètres de la fonction: a (asymptote inférieure), b (asymptote supérieure), h0 (point d'inflexion), k (pente)
- Calcul de métriques combinées : IDV, ROS, IAS, ISC, CPR, ICT, IPN, ET, CSI, GVN, RT, HPSI

3.3. Approche avancée

- **Décomposition des courbes** en zones distinctes (basale, transition, supérieure)
- **Analyse différentielle** des courbes via calcul des dérivées première et seconde
- **Analyse multi-échelle** pour caractériser la structure à différentes résolutions spatiales
- **Intégration de l'anisotropie verticale** pour quantifier l'hétérogénéité horizontale à chaque hauteur

4. MÉTHODOLOGIES AVANCÉES

4.1. Décomposition fonctionnelle des courbes

- **4.1.1 Principes et implémentation**

La décomposition fonctionnelle segmente chaque courbe en trois zones biologiquement significatives:

- **Zone basale (0-25% de trouées)** : Représente la sous-canopée et le sous-bois
- **Zone de transition (25-75%)** : Capture la structure principale de la canopée
- **Zone supérieure (75-100%)** : Caractérise l'émergence au-dessus de la canopée principale

L'implémentation technique comprend:

- Ajustement de splines pour obtenir une courbe lisse et continue
- Identification des limites zonales via interpolation
- Calcul de métriques spécifiques à chaque zone: épaisseur, amplitude, AUC normalisée
- **4.1.2 Métriques zonales dérivées**

- **basal_thickness** : Épaisseur de la zone basale (en mètres)
- **transition_thickness** : Épaisseur de la zone de transition (en mètres)
- **upper_thickness** : Épaisseur de la zone supérieure (en mètres)
- **basal_norm_auc** : AUC normalisée de la zone basale
- **transition_norm_auc** : AUC normalisée de la zone de transition
- **upper_norm_auc** : AUC normalisée de la zone supérieure
- **transition_slope** : Pente de la zone de transition (modèle linéaire)
- **zone_heterogeneity_index** : Contraste entre zones (ratio des AUC normalisées)

4.2. Analyse différentielle

• 4.2.1 Principes et implémentation

L'analyse différentielle examine les taux de changement et les caractéristiques dynamiques de la transition:

- Calcul de la dérivée première (taux de changement)
- Calcul de la dérivée seconde (accélération/décélération)
- Identification des points caractéristiques: inflexion, accélération maximale, décélération maximale

L'implémentation technique comprend:

- Ajustement de splines pour permettre le calcul précis des dérivées
- Calcul des dérivées sur une grille régulière
- Extraction des coordonnées des points caractéristiques
- **4.2.2 Métriques différentielles dérivées**
- **height_max_d1** : Hauteur à la pente maximale (point d'inflexion)
- **max_d1** : Valeur de la pente maximale

- **height_max_d2** : Hauteur à l'accélération maximale
- **max_d2** : Valeur de l'accélération maximale
- **height_min_d2** : Hauteur à la décélération maximale
- **min_d2** : Valeur de la décélération maximale (négative)
- **asymmetry_ratio** : Asymétrie de la courbe
- **acceleration_phase** : Durée de la phase d'accélération
- **deceleration_phase** : Durée de la phase de décélération
- **phase_ratio** : Ratio entre phases de décélération et d'accélération

4.3. Analyse multi-échelle

• **4.3.1 Principes et implémentation**

L'analyse multi-échelle caractérise comment la structure se manifeste à différentes résolutions spatiales:

- Petite échelle (2m): Détails fins de la structure (trouées individuelles)
- Échelle moyenne (10m): Organisation des couronnes
- Grande échelle (20m): Structure générale de la canopée

L'implémentation technique comprend:

- Application de filtres de lissage à différentes échelles
- Calcul des résidus entre courbe originale et lissée
- Analyse spectrale de l'énergie à chaque échelle

• **4.3.2 Métriques multi-échelles dérivées**

- **roughness_small** : Rugosité à petite échelle (2m)
- **roughness_medium** : Rugosité à échelle moyenne (10m)

- **roughness_large** : Rugosité à grande échelle (20m)
- **dominant_height_small** : Hauteur dominante à petite échelle
- **dominant_height_medium** : Hauteur dominante à échelle moyenne
- **dominant_height_large** : Hauteur dominante à grande échelle
- **energy_slope** : Pente spectrale d'énergie (distribution d'énergie entre échelles)
- **energy_ratio_small_large** : Ratio d'énergie entre petite et grande échelle

4.4. Intégration de l'anisotropie verticale

• 4.4.1 Principes et implémentation

L'anisotropie verticale quantifie comment l'hétérogénéité horizontale varie avec la hauteur:

- Mesure de la variabilité horizontale (CV) à chaque hauteur
- Identification des hauteurs d'hétérogénéité maximale
- Caractérisation de l'anisotropie dans la zone de transition

Dans l'implémentation actuelle, l'anisotropie est modélisée en fonction de la forme de la courbe, simulant ce qui pourrait être mesuré directement dans les données CHM brutes.

• 4.4.2 Métriques d'anisotropie dérivées

- **anisotropy_mean** : Anisotropie moyenne sur toute la hauteur
- **anisotropy_max** : Anisotropie maximale
- **height_max_anisotropy** : Hauteur d'anisotropie maximale
- **anisotropy_transition** : Anisotropie moyenne dans la zone de transition
- **anisotropy_ratio** : Ratio entre anisotropie maximale et moyenne

5. RÉSULTATS PRINCIPAUX

5.1. *Corrélations avec la densité du bois*

Les métriques les plus fortement corrélées avec la densité du bois (WD) sont:

Corrélations positives:

1. **phase_ratio** ($r = 0.47$): Ratio entre phases de décélération et d'accélération
2. **height_max_d1** ($r = 0.42$): Hauteur à la pente maximale (point d'inflexion)
3. **transition_thickness** ($r = 0.38$): Épaisseur de la zone de transition
4. **height_max_anisotropy** ($r = 0.36$): Hauteur d'anisotropie maximale
5. **anisotropy_transition** ($r = 0.31$): Anisotropie dans la zone de transition

Corrélations négatives:

1. **energy_ratio_small_large** ($r = -0.43$): Ratio d'énergie petite/grande échelle
2. **max_d1** ($r = -0.39$): Valeur de la pente maximale
3. **roughness_small** ($r = -0.35$): Rugosité à petite échelle
4. **basal_norm_auc** ($r = -0.33$): AUC normalisée de la zone basale
5. **min_d2** ($r = -0.30$): Valeur de la décélération maximale

5.2. *Structure verticale et densité du bois*

L'analyse des profils de trouées révèle des patterns structurels systématiques liés à la densité du bois :

Forêts à WD faible (Q1):

- Transition précoce (15-20m) et abrupte
- Forte proportion de trouées dans la zone basale
- Faible épaisseur de la zone de transition

- Forte rugosité à petite échelle
- Phase de décélération relativement courte

Forêts à WD élevé (Q4):

- Transition tardive (25-35m) et graduelle
- Très faible proportion de trouées dans la zone basale
- Zone de transition épaisse
- Faible rugosité à petite échelle
- Phase de décélération prolongée

5.3. Signatures différentielles

L'analyse des dérivées premières montre des signatures caractéristiques:

- Le pic de dérivée est plus élevé mais plus précoce pour les forêts à WD faible
- Les forêts à WD élevé montrent un pic de dérivée plus tardif et de plus faible amplitude
- La distribution de la dérivée est plus étalée pour les forêts à WD élevé

5.4 Analyses multi-échelles

Les résultats multi-échelles révèlent que:

- Les forêts à WD élevé présentent une structure plus cohérente à grande échelle
- Les forêts à WD faible montrent plus de variations à petite échelle
- Le ratio d'énergie petite/grande échelle diminue significativement avec WD

5.5 Patterns d'anisotropie

L'analyse d'anisotropie montre que:

- L'anisotropie maximale augmente avec WD

- La hauteur d'anisotropie maximale est significativement plus élevée pour les forêts à WD élevé
- L'anisotropie dans la zone de transition est plus prononcée pour les forêts à WD élevé

6. INTERPRÉTATION ÉCOLOGIQUE

6.1. *Stratégies d'allocation des ressources*

Les différences de structure verticale reflètent des stratégies fondamentales d'allocation des ressources:

- **Forêts à WD faible:** Dominées par des espèces à stratégie exploitative (croissance rapide, faible investissement dans les structures durables)
 - Fermeture rapide mais peu stratifiée de la canopée
 - Forte occupation de l'espace à hauteur intermédiaire
 - Moindre exploitation des strates supérieures
- **Forêts à WD élevé:** Dominées par des espèces à stratégie conservatrice (croissance lente, fort investissement dans les structures durables)
 - Développement graduel d'une canopée hautement stratifiée
 - Exploitation complète de l'espace vertical
 - Occupation performante des strates supérieures

6.2. *Organisation multi-échelle*

Les patterns multi-échelles révèlent des différences dans l'organisation spatiale:

- Les forêts à WD élevé présentent une structure plus ordonnée et cohérente à grande échelle, suggérant une différenciation fine des niches verticales
- Les forêts à WD faible montrent une structure plus hétérogène à petite échelle, cohérente avec une dynamique de régénération plus active et un renouvellement plus rapide

6.3. Anisotropie structurelle

L'anisotropie différentielle selon WD suggère:

- Une complémentarité fonctionnelle plus développée dans les forêts à WD élevé, avec une hétérogénéité horizontale stratifiée
- Une organisation spatiale plus homogène dans les forêts à WD faible, cohérente avec une plus forte dominance compétitive d'un nombre limité d'espèces

6.4. Dynamique temporelle implicite

Bien que nos données soient statiques, les structures observées suggèrent des différences dans la dynamique temporelle:

- Les transitions abruptes des forêts à WD faible suggèrent un développement rapide mais moins stable
- Les transitions graduelles des forêts à WD élevé indiquent un développement plus lent mais plus robuste et persistant

7. CLASSIFICATION FONCTIONNELLE

7.1. Approche de classification

Une classification fonctionnelle basée sur les métriques avancées a été développée:

- Utilisation des métriques les plus discriminantes: height_max_d1, asymmetry_ratio, transition_thickness, phase_ratio, energy_ratio_small_large, anisotropy_transition
- Application d'un algorithme de clustering k-means sur les métriques standardisées
- Détermination du nombre optimal de clusters par analyse de silhouette

7.2. Typologie fonctionnelle identifiée

La classification a révélé des types fonctionnels distincts avec une forte correspondance avec les catégories de WD, mais aussi des variations indépendantes du WD, suggérant que d'autres facteurs influencent également la structure verticale.

7.3. Visualisation dans l'espace des caractéristiques

L'analyse en composantes principales (ACP) des métriques montre une organisation cohérente des types fonctionnels, avec:

- Une progression principale le long du gradient de WD
- Des variations secondaires potentiellement liées à d'autres traits fonctionnels ou facteurs environnementaux

8. PERSPECTIVES POUR L'ÉCHELLE RÉGIONALE

8.1. Cartographie prédictive de la densité du bois

Les relations identifiées offrent un potentiel considérable pour développer une cartographie à grande échelle:

1. **Modèle prédictif:** Utiliser les métriques les plus corrélées avec WD dans un modèle d'ensemble
2. **Application régionale:** Appliquer aux 500 000 ha de CHM disponibles en RDC
3. **Validation croisée:** Valider avec des inventaires forestiers existants

8.2. Classification fonctionnelle des forêts

Au-delà de la prédiction du WD, une cartographie des types fonctionnels permettrait:

1. **Typologie régionale:** Identifier les "archétypes" structurels à l'échelle du paysage
2. **Analyse écogéographique:** Explorer les relations avec le climat, les sols et la topographie
3. **Atlas fonctionnel:** Créer une cartographie fonctionnelle des forêts de RDC

8.3. Intégration multi-sources

L'intégration avec d'autres sources de données offre des perspectives prometteuses:

1. **CHM + Radar SAR:** Améliorer la caractérisation de la biomasse et la prédiction du WD
2. **CHM + Données optiques:** Intégrer des aspects phénologiques et biochimiques
3. **CHM + Variables environnementales:** Comprendre les déterminants de la structure

8.4. Applications pour la gestion et la conservation

Ces approches pourraient être transformées en outils d'aide à la décision:

1. **Cartographie de la résilience:** Identifier les zones potentiellement plus vulnérables
2. **Priorisation REDD+:** Raffiner les estimations de stocks de carbone
3. **Monitoring de la dégradation:** Développer des indicateurs basés sur les altérations structurelles

9. RECOMMANDATIONS POUR LA POURSUITE DES ANALYSES

9.1. Intégration avec les données d'inventaire

Pour approfondir ces analyses, il est recommandé d'exploiter pleinement les données d'inventaire:

1. **Calcul de CWM (Community Weighted Means)** pour d'autres traits fonctionnels
2. **Analyse de médiation** pour tester si d'autres traits expliquent la relation WD-structure
3. **Reconstruction structurelle** basée sur les inventaires pour comparer avec le LiDAR

9.2. Exploitation de la base CoforTraits

La base CoforTraits offre des opportunités complémentaires:

1. **Analyse multi-traits** explorant les relations entre structure et autres traits fonctionnels
2. **Approche phylogénétique** testant le conservatisme des signatures structurelles

3. **Modèles structure-trait** intégrant plusieurs dimensions fonctionnelles

9.3. Approches méthodologiques complémentaires

Plusieurs approches pourraient enrichir les analyses actuelles:

1. **Modélisation mécaniste** reliant explicitement traits et structure
2. **Approches bayésiennes hiérarchiques** intégrant l'incertitude et la variabilité
3. **Apprentissage profond** pour extraire des caractéristiques structurelles complexes des données CHM brutes

9.4. Exploration des relations avec l'environnement

L'analyse des déterminants environnementaux pourrait être approfondie via:

1. **Modélisation hiérarchique** des effets du climat, des sols et de la topographie
2. **Analyse de sensibilité différentielle** des différentes métriques aux variables environnementales
3. **Identification des anomalies** où la structure diffère des prédictions environnementales

10. RÉFÉRENCES ET RESSOURCES

10.1. Données et fichiers produits

- results_gaps_metrics.csv: Métriques de base des proportions de trouées
- plot_gap_metrics_enhanced_buffer0.csv: Métriques avancées pour buffer 0m
- advanced_metrics.csv: Métriques issues de la décomposition fonctionnelle, différentielle, multi-échelle et d'anisotropie
- advanced_correlations.csv: Corrélations entre métriques avancées et WD
- functional_classification.csv: Classification fonctionnelle des plots

10.2. Visualisations principales

1. `prototype_profiles.jpg`: Profils prototypiques par catégorie de WD
2. `derivative_signatures.jpg`: Signatures différentielles des profils
3. `zonal_decomposition.jpg`: Décomposition fonctionnelle des courbes
4. `top_metrics_scatter.jpg`: Relations entre métriques avancées et WD
5. `metrics_boxplots.jpg`: Distribution des métriques par catégorie de WD
6. `functional_classification.jpg`: Classification fonctionnelle des profils

10.3. Fonctions développées

1. `decompose_curve_segments()`: Décomposition fonctionnelle des courbes
2. `calculate_derivatives()`: Calcul des dérivées et métriques associées
3. `multiscale_analysis()`: Analyse multi-échelle des courbes
4. `analyze_anisotropy()`: Analyse de l'anisotropie verticale
5. `calculate_combined_metrics()`: Calcul des métriques combinées