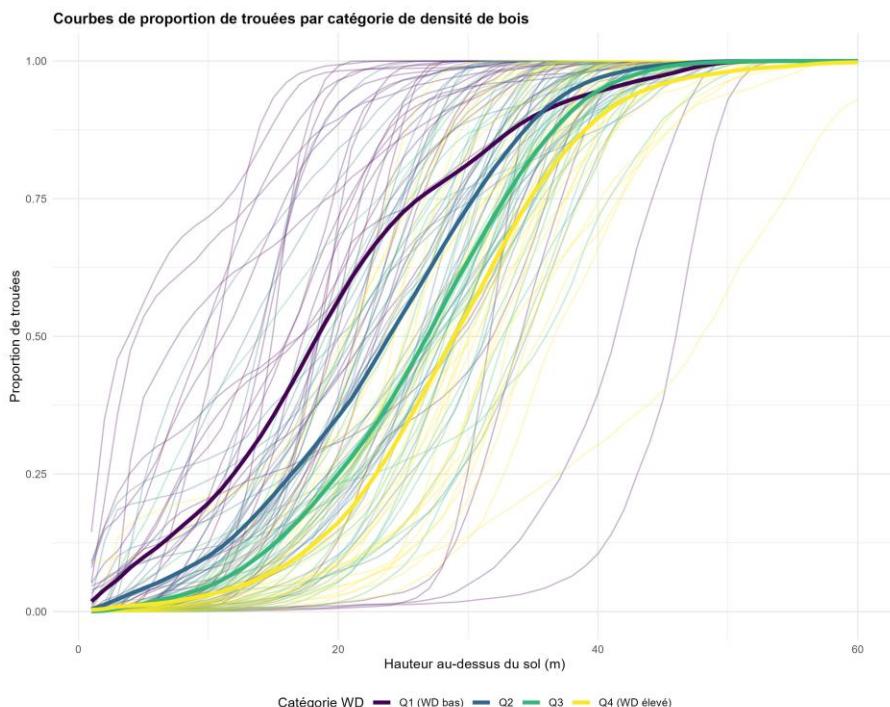


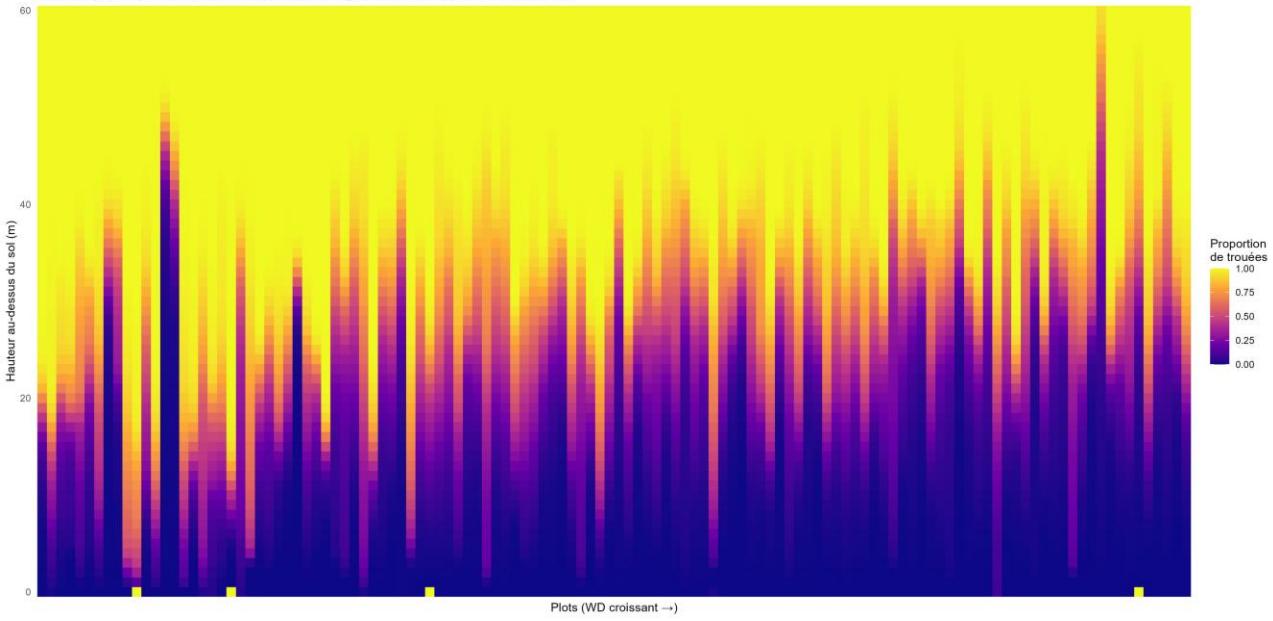
ANALYSES DE BASE

1

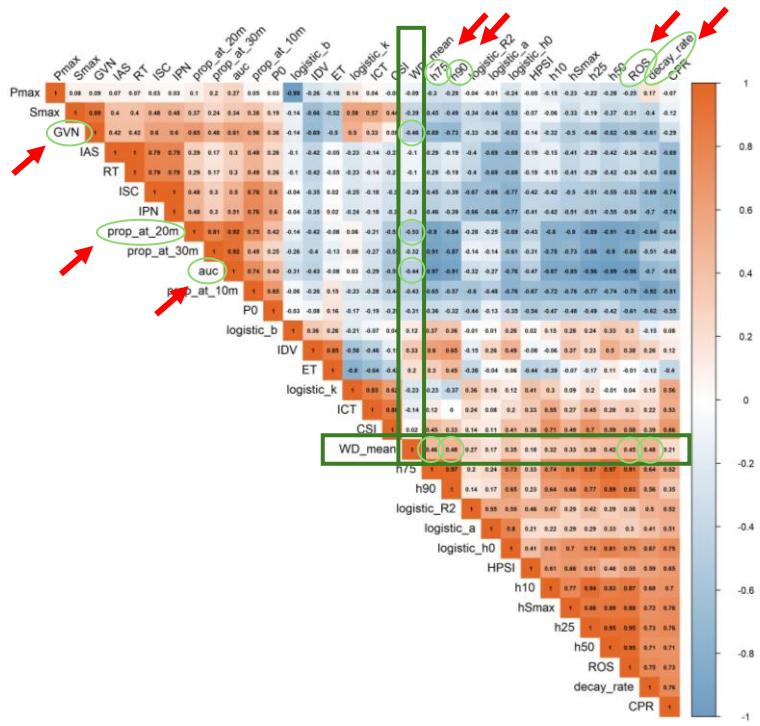


2

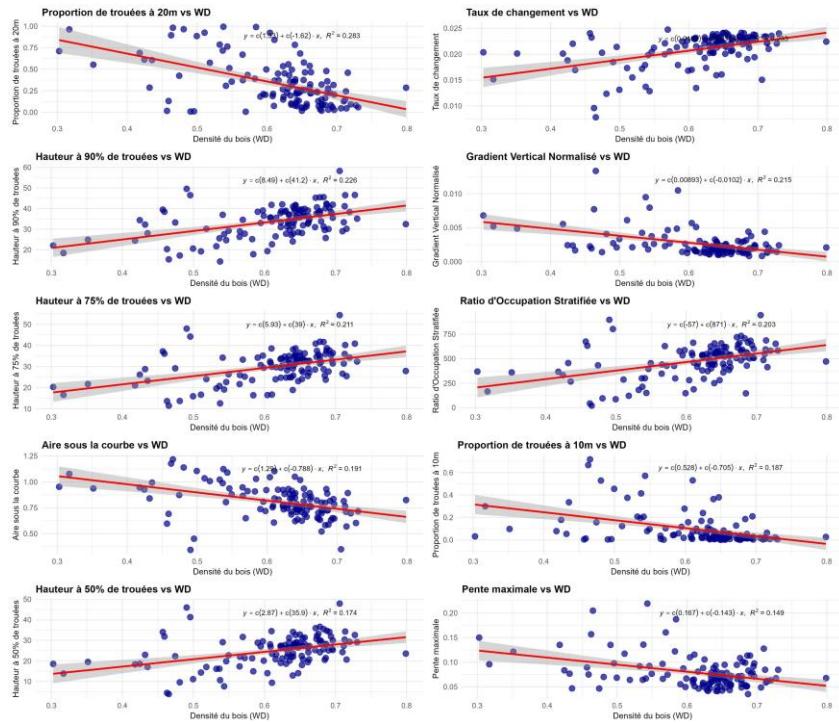
Heatmap des profils de trouées ordonnés par densité du bois croissant



3

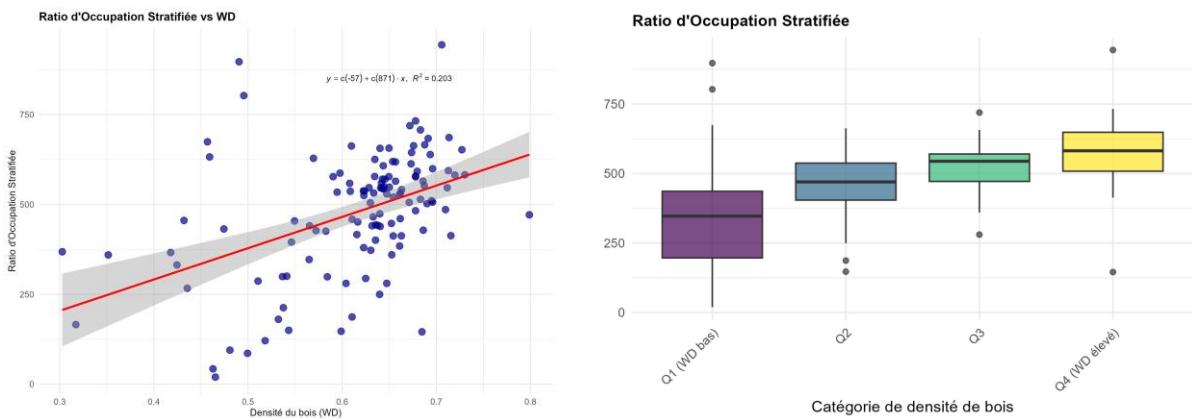


4



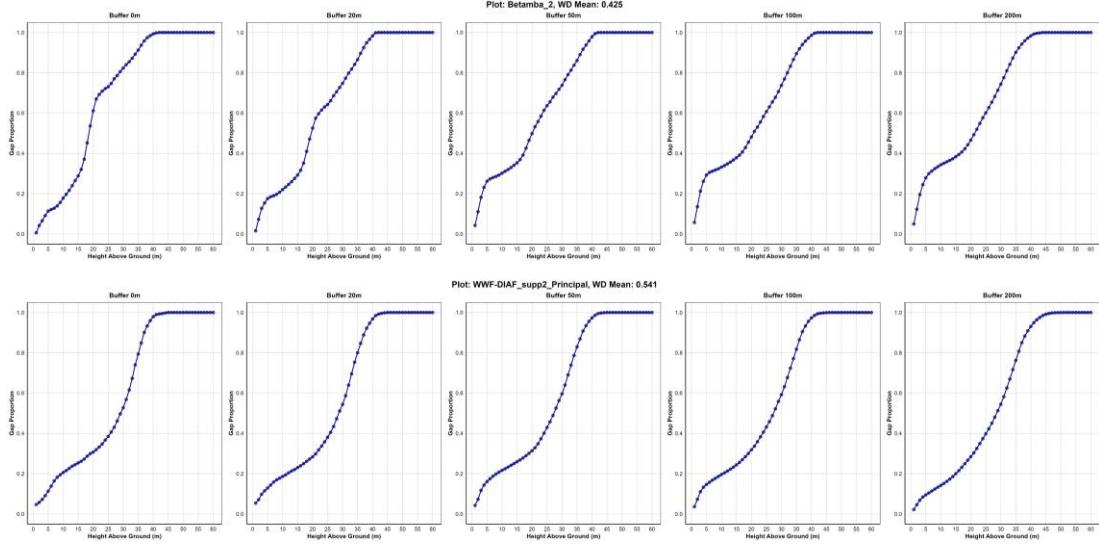
5

Ratio d'Occupation Stratifiée :
 élevé pour forêts à WD élevée (h50 élevé, P0 très faible)
→ ROS = h50 / (P0 + 0.05)



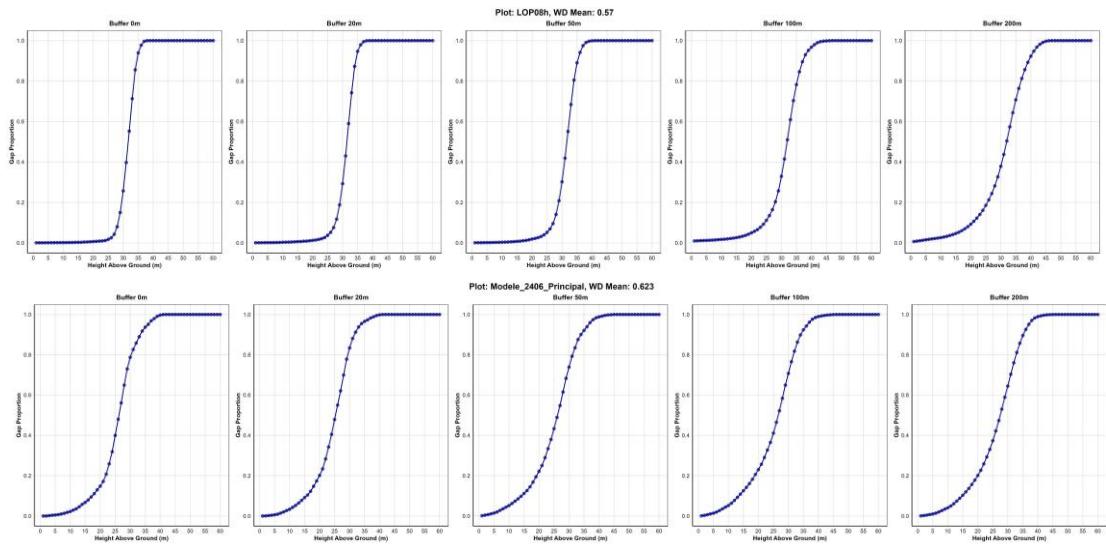
6

Représentativité spatiale



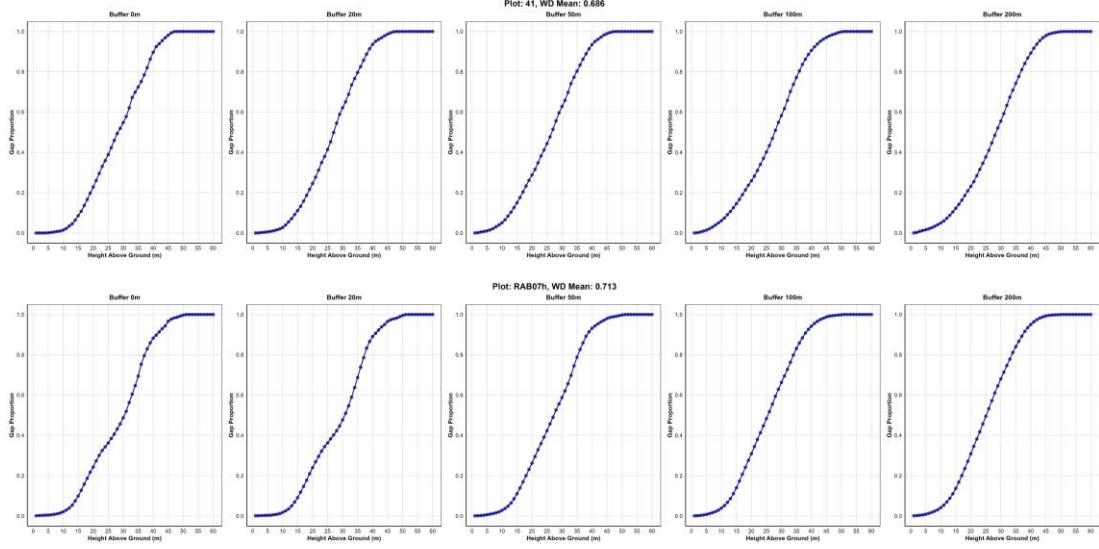
7

Représentativité spatiale



8

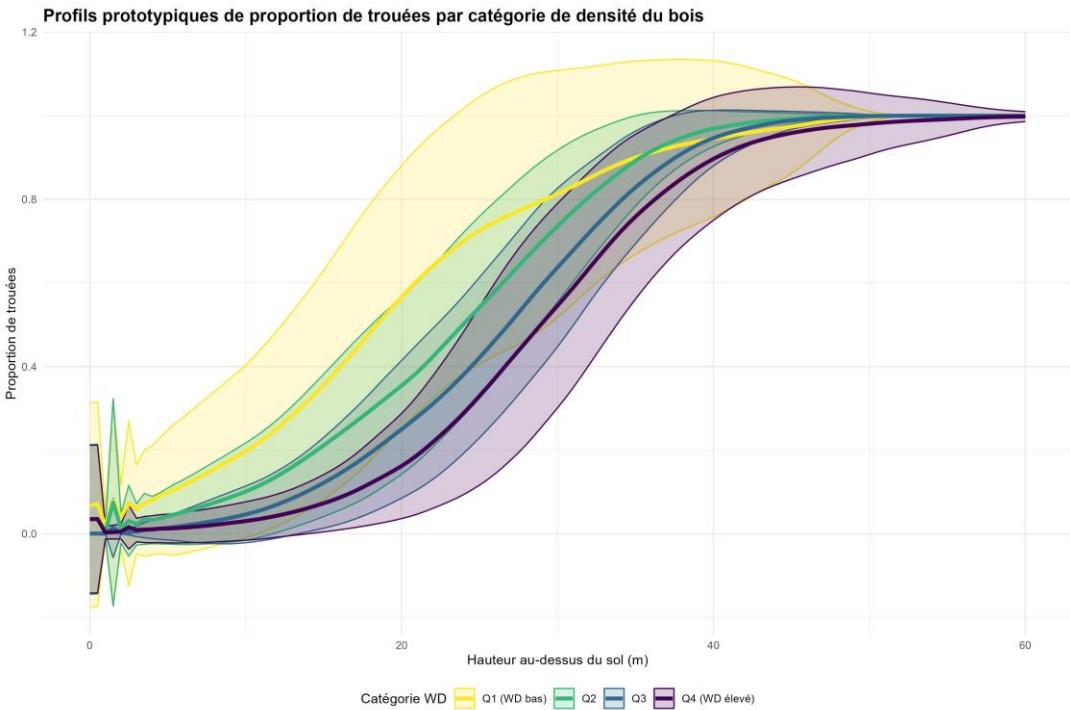
Représentativité spatiale



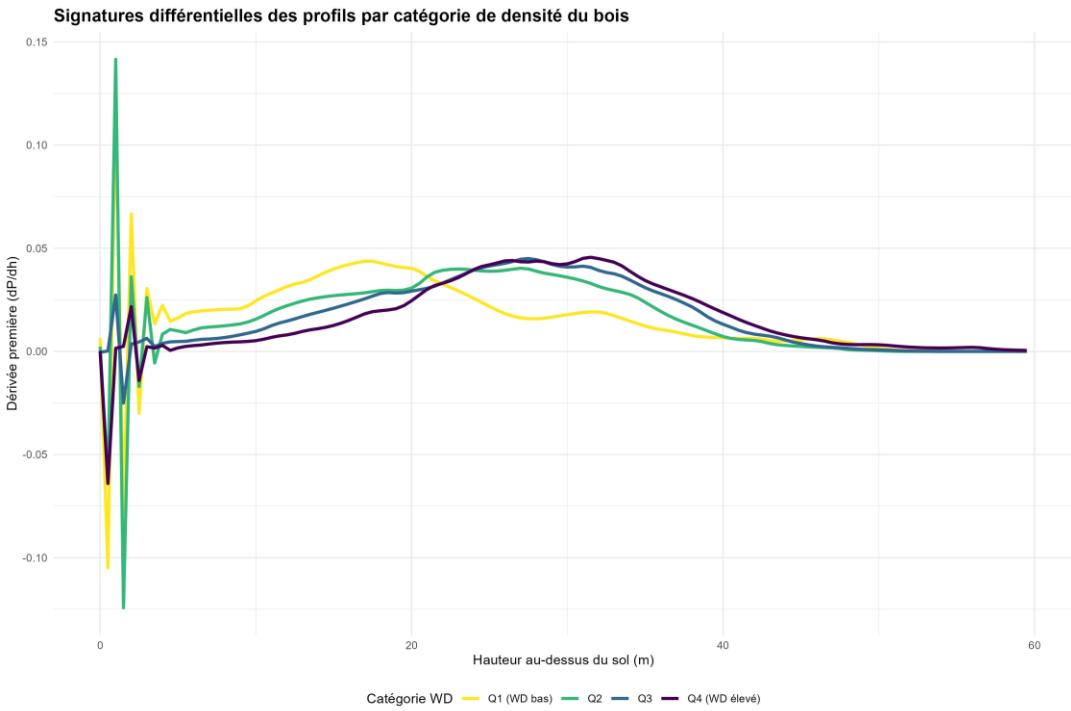
9

ANALYSES APPROFONDIES

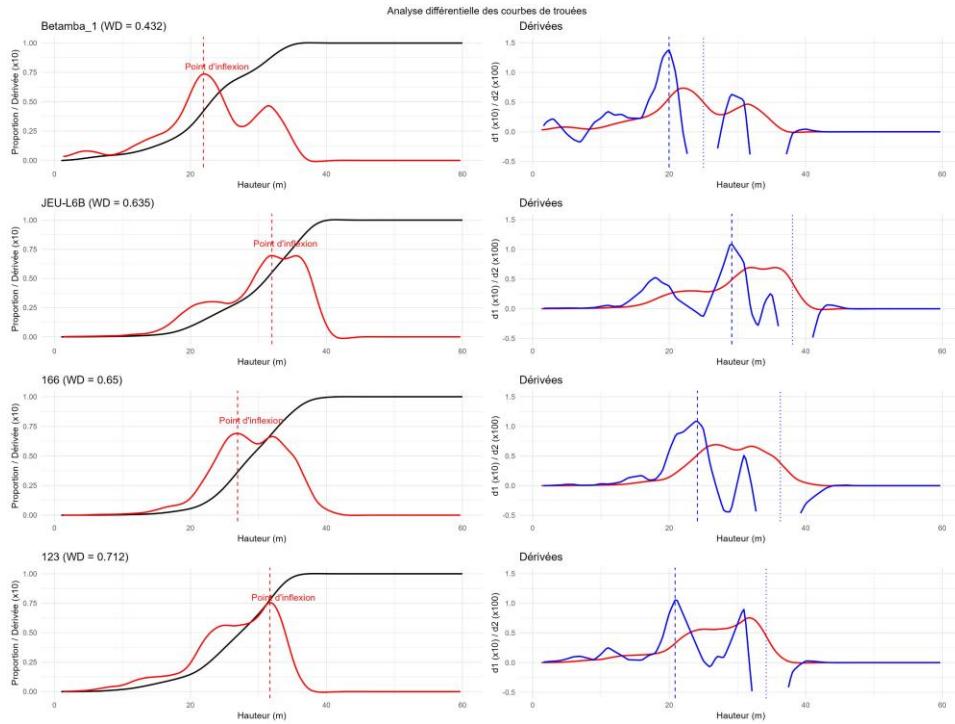
10



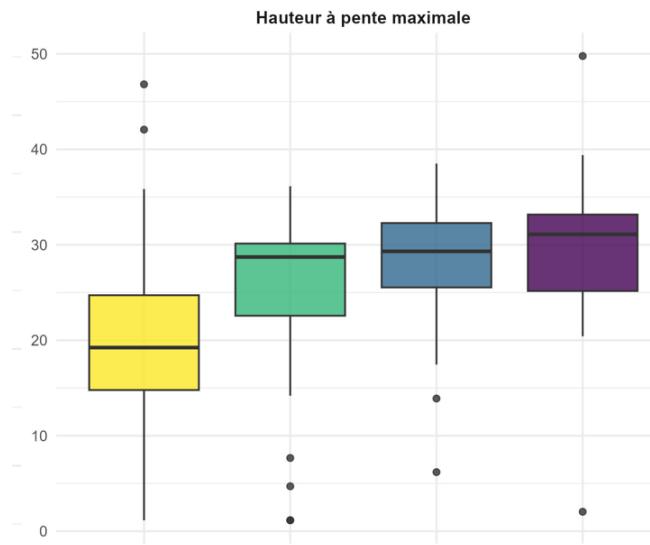
11



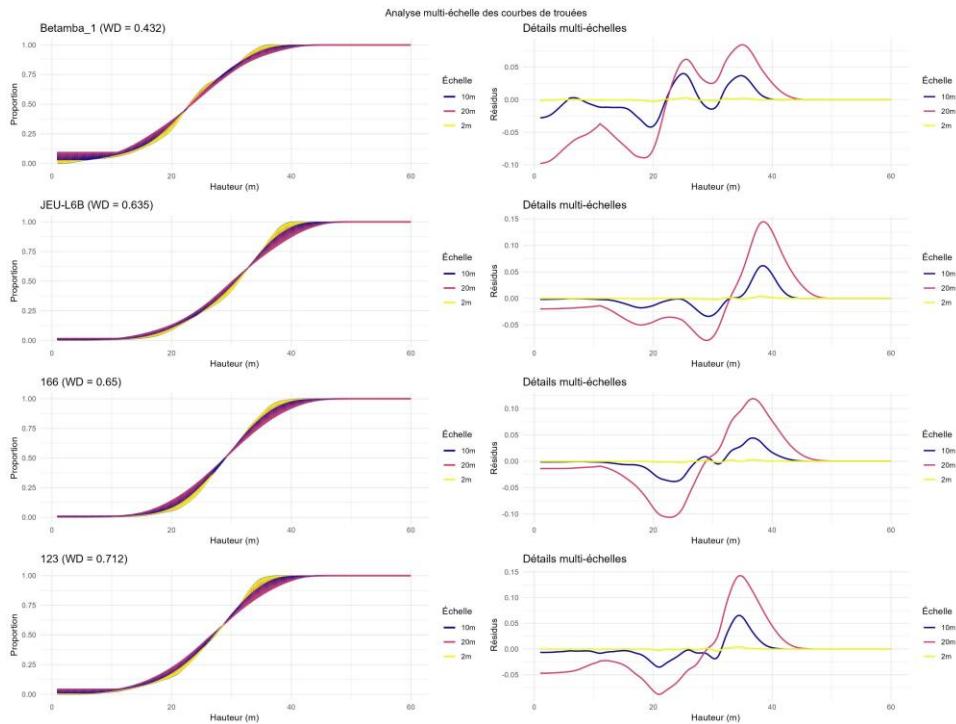
12



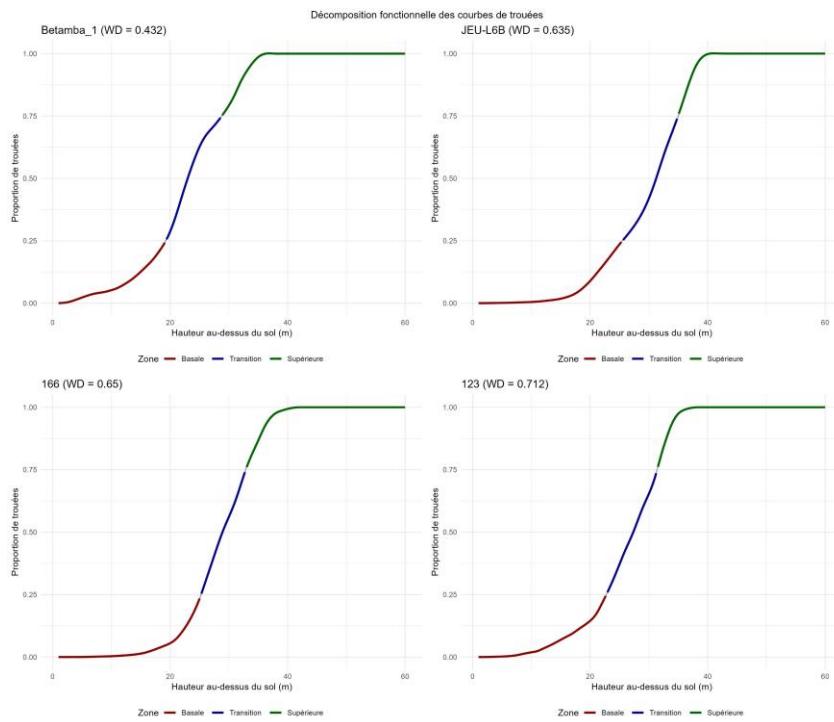
13



14

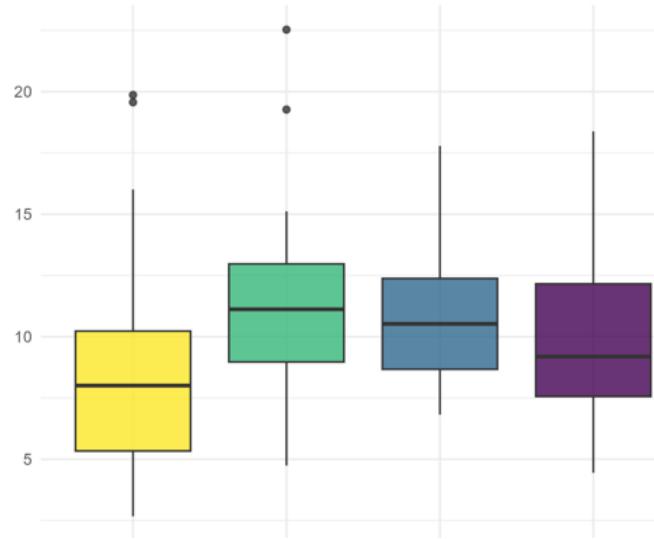


15

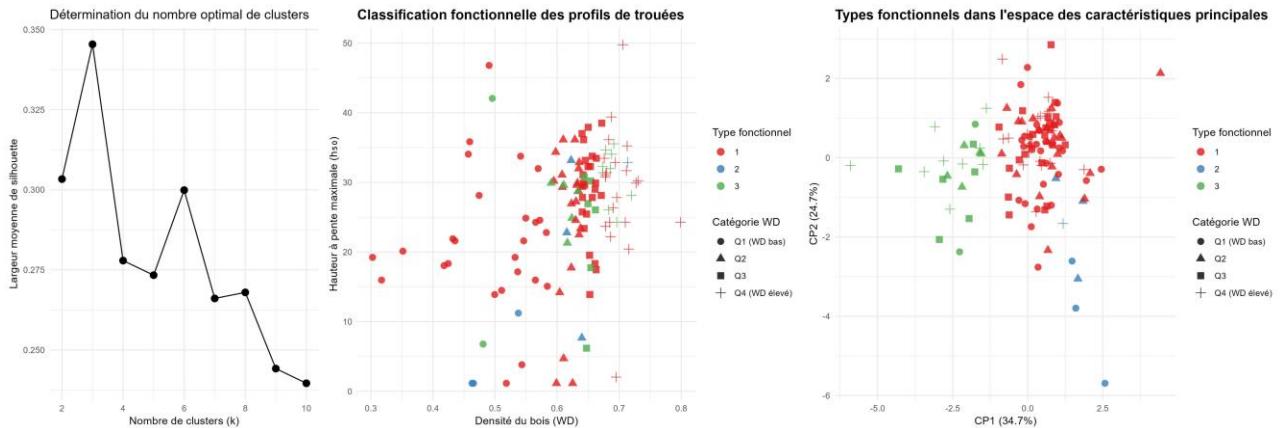


16

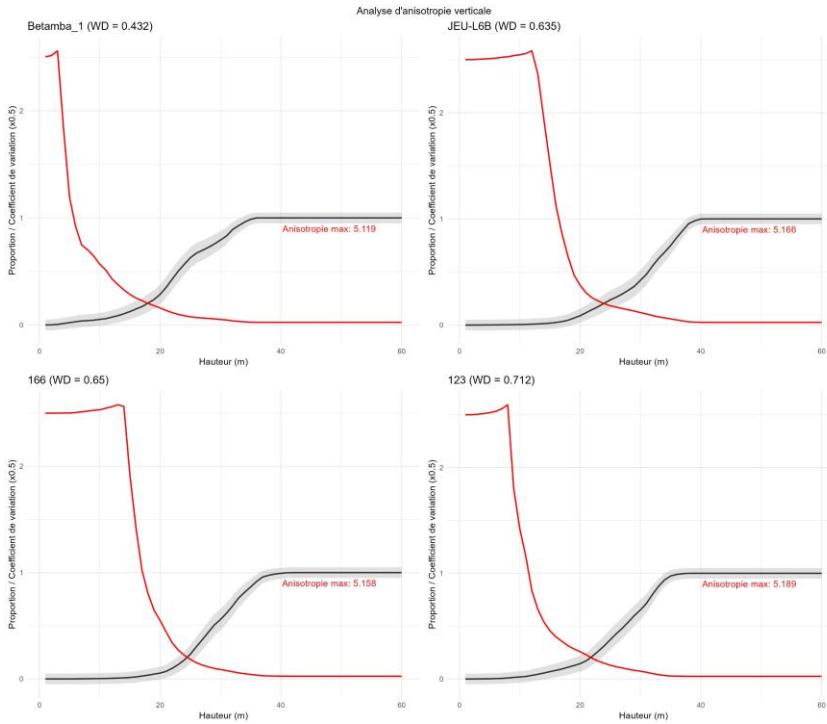
Épaisseur zone de transition



17



18



19

Résultats principaux : structure vertical et WD

Forêts à WD faible

- 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

- 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

20

Résultats principaux : signatures différentielles → à confirmer par analyses plus poussées

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

21

Résultats principaux : analyses multi-échelles → à confirmer par analyses plus poussées

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

22

Résultats principaux : patterns d'anisotropie → à confirmer par analyses plus poussées

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

23

Architecture et stratégie écologique

- La stratification verticale est plus complexe dans les forêts à WD élevé ; aspects étagés de la canopée
- Les transitions graduelles suggèrent une occupation plus homogène de l'espace vertical
- La progression du point h50 avec WD (plus tardif pour WD élevé) indique une répartition différente des surfaces photosynthétiques
- La pente maximale réduite pour WD élevé suggère une stratification plus fine

24

Paramètres logistiques significatifs

- Le point d'infexion logistique (h_0) corrélé positivement avec WD reflète une "signature structurelle" distinctive
- La pente logistique (k) négativement corrélée avec WD confirme la transition plus graduelle

25

Confrontation aux connaissances actuelles

- Relation trait-structure → paradigme de l'"economics spectrum" végétal, où des traits fonctionnels reflètent des stratégies d'acquisition et d'utilisation des ressources ; documentée à l'échelle des arbres individuels plutôt qu'à celle des communautés entières.
- Travaux sur les compromis fonctionnels
- Attention : Les différences d'architecture de couronne entre espèces à bois léger (souvent couronnes larges, monopodiales) et dense (souvent couronnes plus étroites, sympodiales) pourraient expliquer les patterns observés indépendamment de la densité du bois elle-même → contrôler dans l'analyse ?

26

Bilan de notre approche

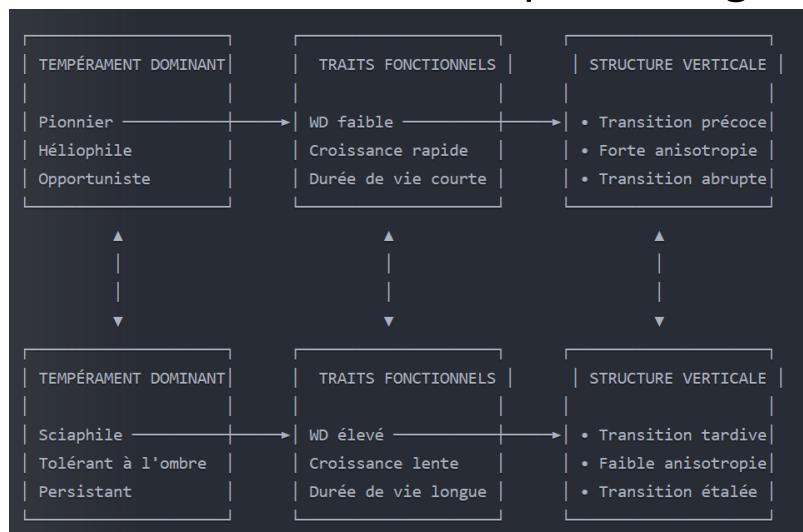
Nous avons développé une méthodologie novatrice qui décompose les profils de trouées forestières en plusieurs dimensions complémentaires :

- Structure zonale : séparation en zones basale, transition et supérieure
- Dynamique de transition : analyse des dérivées et points caractéristiques
- Organisation multi-échelle : décomposition des structures à différentes résolutions
- Variabilité horizontale : caractérisation de l'anisotropie verticale

Cette approche a produit un ensemble riche de métriques quantitatives qui ont révélé des relations significatives avec la densité du bois (WD), confirmant l'hypothèse que ce trait fonctionnel est profondément lié à l'architecture tridimensionnelle des forêts tropicales.

27

La structure tridimensionnelle comme signature fonctionnelle : Un cadre conceptuel intégratif



28

La structure tridimensionnelle comme signature fonctionnelle : Un cadre conceptuel intégratif

1. Introduction: Présenter le lien théorique entre traits fonctionnels et structure 3D comme une nouvelle fenêtre sur l'écologie forestière

2. Méthodes: Mettre en avant les innovations analytiques clés:

- Décomposition zonale (visualisation Image 10)
- Analyse différentielle (visualisation Image 3)
- Analyse multi-échelle (visualisation Image 6)

3. Résultats: Se concentrer sur les trois relations les plus robustes:

- Hauteur de transition vs WD ($R^2 \approx 0.35$, visualisation Image 9)
- Asymétrie de transition vs WD ($R^2 \approx 0.20$)
- Ratio d'énergie multi-échelle vs WD ($R^2 \approx 0.25$)

4. Discussion: Articuler le cadre conceptuel intégratif structure-fonction-succession, en soulignant:

- L'expression des stratégies d'allocation des ressources dans la structure 3D
- Les implications pour comprendre les trajectoires successionnelles
- Les applications pour la télédétection des traits fonctionnels

29

POUR LA SUITE

30

Perspectives

- Explorer si ces signatures structurelles sont liées à d'autres propriétés écosystémiques (productivité, biodiversité) ; Analyser si la complexité structurelle liée au WD élevé est corrélée à une plus grande biodiversité
- Explorer la signification des déviations par rapport au modèle logistique (les *résidus* comme signature structurelle) ; caractériser la distribution logistique standard d'une forêt mature intacte et utiliser un "indice de déviation logistique" et cartographiez ces déviations (en lien avec certains types de forêts ?)
- Approfondir les métriques différentielles et dérivées ("indice d'asymétrie différentielle" basé sur le rapport entre l'accélération maximale et la décélération maximale, ou voir avec les métriques corrélées.) ; Normaliser ces valeurs par rapport à la hauteur totale pour obtenir des métriques comparables entre sites.

31

Perspectives

- Analyse de redondance et complémentarité:
 - Évaluer la redondance informationnelle entre métriques traditionnelles et nouvelles métriques multi-échelles
 - Identifier les combinaisons de métriques qui maximisent le pouvoir explicatif pour les traits fonctionnels
 - Développer un cadre d'intégration optimal entre données LiDAR et traits fonctionnels
- Contextualisation écologique approfondie ;
- Exploitation des données topographiques (DEM) :
 - Calculer des métriques topographiques complexes :
 - Indice topographique d'humidité (TWI)
 - Rugosité du terrain à différentes échelles
 - Exposition solaire potentielle
 - Courbure du terrain (convexité/concavité)
 - Intégrer ces métriques comme co-variables dans les analyses :
 - Contrôler pour les effets topographiques sur la structure
 - Tester les interactions entre topographie et relations structure-traits
 - Identifier les signatures structurelles spécifiques à certaines conditions topographiques

32

Perspectives

- Implémentation rigoureuse de validation croisée :
 - Validation croisée spatiale (blocs géographiques)
 - Validation croisée k-fold stratifiée par gradients environnementaux
 - Bootstrap pour intervalles de confiance robustes
 - Évaluation de la stabilité des prédictions
- Analyse des résidus spatialement explicite :
 - Cartographie des résidus pour détecter les patterns spatiaux
 - Identification des zones de sur/sous-prédiction
 - Recherche de variables explicatives manquantes pour les résidus
- Développer des modèles d'équations structurelles (SEM) complets intégrant :
 - Variables topographiques → structure 3D → traits fonctionnels
 - Effets directs et indirects entre variables
 - Corrélations entre traits fonctionnels
 - Rétroactions potentielles
 - Comparer des modèles alternatifs testant différentes hypothèses causales (Modèle de médiation directe (topographie → structure → traits) ; Modèle de médiation partielle (effets directs et indirects) ; Modèle de modération (interactions entre prédicteurs))
 - Évaluer la robustesse des modèles (Analyse multi-groupe pour tester l'invariance des relations selon les conditions; Bootstrap pour quantifier l'incertitude des chemins causaux ; Diagnostics de modèle complets (indices d'ajustement, résidus))

33

Perspectives : intégration des données d'inventaires

- Couplage avec les données d'inventaire:
 - Calculer pour chaque plot des métriques structurelles issues de l'inventaire: distribution diamétrique, allométrie H/D, densité de tiges par classe de taille
 - Développer un "indice de concordance structurelle" entre les patterns de trouées et la structure physique mesurée
 - Tester si les résidus des modèles WD-trouées sont expliqués par ces métriques structurelles
- Validation croisée fonctionnelle:
 - Vérifier si les points caractéristiques des courbes de trouées (e.g., h50) correspondent aux hauteurs de dominance des groupes fonctionnels identifiés dans l'inventaire
 - Tester si l'amplitude des transitions corrèle avec la diversité fonctionnelle à ces hauteurs spécifiques
- Connexion avec les traits fonctionnels (CoforTraits):
 - Calculer pour chaque plot des métriques de composition basées sur les traits fonctionnels: distribution de SLA, WD, hauteur maximale, architecture de la couronne
 - Pondérer ces métriques par l'abondance relative ou la surface terrière des espèces
 - Tester si les syndromes de traits prédisent les patterns multi-échelles et d'anisotropie

34

Perspectives : intégration des données d'inventaires

Intégration robuste avec les données d'inventaire et CoforTraits

- Calculer des métriques pondérées par communauté (CWM) pour plusieurs traits :
 - Densité du bois (WD)
 - Surface foliaire spécifique (SLA)
 - Hauteur maximale potentielle
 - Tolérance à l'ombre
 - Mode de dispersion
 - Architecture de la couronne
- Analyser les corrélations entre traits pour comprendre leurs covariations :
 - Matrice de corrélation entre tous les traits disponibles
 - Analyse en composantes principales des traits fonctionnels
 - Identification des axes fonctionnels principaux
- Développer des indices de diversité fonctionnelle :
 - Richesse fonctionnelle (FRic)
 - Divergence fonctionnelle (FDiv)
 - Dispersion fonctionnelle (FDis)
 - Équitabilité fonctionnelle (FEve)

35

Perspectives : intégration des données d'inventaires

- Modélisation mécaniste traits-structure ; Développer des modèles d'équations structurelles (SEM) testant les chaînes causales entre distribution de trouées → (traits architecturaux OU composition spécifique) - → WD ; Quantifier les effets directs vs indirects de la structure verticale sur les traits
- Analyses de traits pondérés par la communauté ;
 - Calculer pour chaque plot les traits moyens pondérés (CWM) pour les attributs clés: SLA, hauteur maximale, architecture de couronne, tolérance à l'ombre
 - Tester si les courbes de trouées prédisent mieux les CWM que le WD seul
 - Développer un modèle intégratif de prédiction bidirectionnelle: traits↔structure
- Intégration de proximité de composition spécifique : est-ce que les plots dominés par une composition (spécifique ou fonctionnelle) typique présentent des profiles de trouées caractéristiques ? (analyse multivariée)

36

Hypothèses écologiques et analyses complémentaires

- Tester l'hypothèse d'une modification du profil d'ouverture de canopée avant/après exploitation (analyse de Tim) ; Analyser l'évolution du profil de trouées à Luki / Yangambi (séries temporelles, après deep learning) ; Développez des indicateurs de dégradation forestière basés sur les altérations des profils de trouées par rapport aux états de référence.
- Modèle de compétition stratifiée
- Intégrez des données sur le LMA (Leaf Mass per Area) et la SLA (Specific Leaf Area) pour tester si les stratégies d'investissement foliaire correspondent aux patterns de distribution des trouées
- Testez si les indices de complexité dérivés des courbes de trouées (comme l'étalement de la transition ou l'asymétrie) corrèlent avec la diversité taxonomique et fonctionnelle.

37

Idée de discussion et perspectives

- Lien avec le microclimat et processus écosystémiques : le point d'inflexion des courbes pourrait représenter la hauteur où se produit le découplage entre le microclimat forestier et l'atmosphère libre.

38

À l'échelle de la RDC ;

- Modèle prédictif du WD basé sur les métriques structurelles les plus performantes (Random Forest avec métriques clés) ; amélioration des estimations d'AGB à l'échelle de la RDC
- Développer une typologie fonctionnelle par approche de clustering pour identifier des « archétypes » structurels ; croiser avec les variables environnementales pour identifier des niches écologiques spécifiques (topographie : pente, aspect, TWI, ...)
- Analyser la phénologie et la saisonnalité en lien avec les types structurels identifiés
- Développer des indices composites multi-capteurs optimisés pour la prédiction du WD (en dehors du LiDAR) et identifier des hotspots d'anomalies où le WD prédit diffère des attentes basées sur l'environnement

39

À l'échelle de la RDC ;

- L'intégration avec d'autres sources de données offre des perspectives prometteuses:
 - CHM + Radar SAR: Améliorer la caractérisation de la biomasse et la prédiction du WD
 - CHM + Données optiques: Intégrer des aspects phénologiques et biochimiques
 - CHM + Variables environnementales: Comprendre les déterminants de la structure

40

À l'échelle de la RDC : approche phylo-structurelle intégrant fonction et structure

- Potentiellement : Développer une approche d'écologie phylo-structurelle intégrant fonction et structure. Engendrant une classification fonctionnelle basée sur la structure tridimensionnelle (archétypes structurels discrets : types structurels-fonctionnels distincts = assemblages écologiques fondamentaux) + tester un déterminisme environnemental hiérarchique :
 - Les contraintes climatiques régionales (précipitations, saisonnalité) déterminent le pool de types possibles
 - Les facteurs édaphiques (fertilité, texture, drainage) filtrent les types à l'échelle du paysage
 - La topographie fine et l'historique des perturbations expliquent la variabilité locale

41

À l'échelle de la RDC : approche phylo-structurelle intégrant fonction et structure

1. Classification non-supervisée multivariée:

- Appliquer une réduction de dimensionnalité non-linéaire (t-SNE, UMAP) aux métriques dérivées des courbes de trouées
- Implémenter un clustering adaptatif (HDBSCAN) pour identifier les groupements naturels sans imposer un nombre prédéfini de classes
- Développer une approche de classification probabiliste permettant l'attribution de probabilités d'appartenance à chaque type

2. Caractérisation fonctionnelle des types:

- Pour chaque type structurel, modéliser la courbe prototypique et ses variations intrinsèques
- Développer des signatures fonctionnelles basées sur les traits dominants attendus (extrapolés des relations trouvées sur les plots d'inventaire)
- Élaborer un système hiérarchique de classification combinant attributs structurels et fonctionnels

3. Cartographie prédictive intégrée:

- Entraîner un modèle prédictif ensemble (Random Forest, XGBoost) utilisant les variables environnementales pour prédire la probabilité spatiale de chaque type
- Implémenter une approche bayésienne hiérarchique intégrant l'incertitude spatiale et la variabilité intra-type
- Développer des indices de confiance spatialisés pour guider l'interprétation et l'application

4. Validation croisée multi-sources:

- Utiliser les inventaires forestiers existants pour valider la cohérence taxonomique et fonctionnelle des types prédits
- Croiser avec des données indépendantes (biomasse, productivité, phénologie) pour évaluer la pertinence écologique de la classification
- Implémenter une procédure de validation participative intégrant l'expertise locale

42