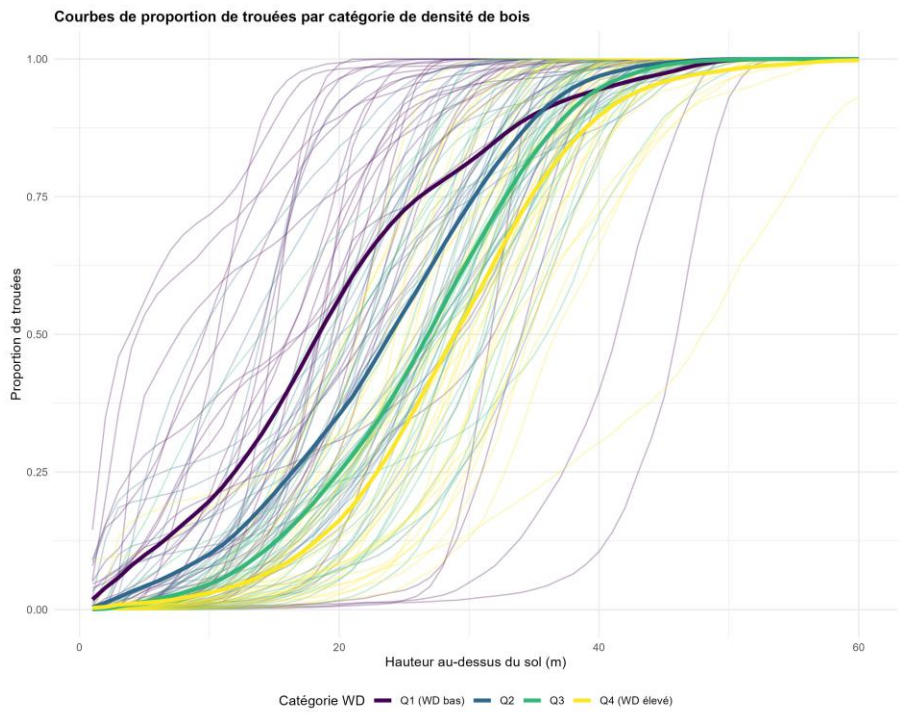
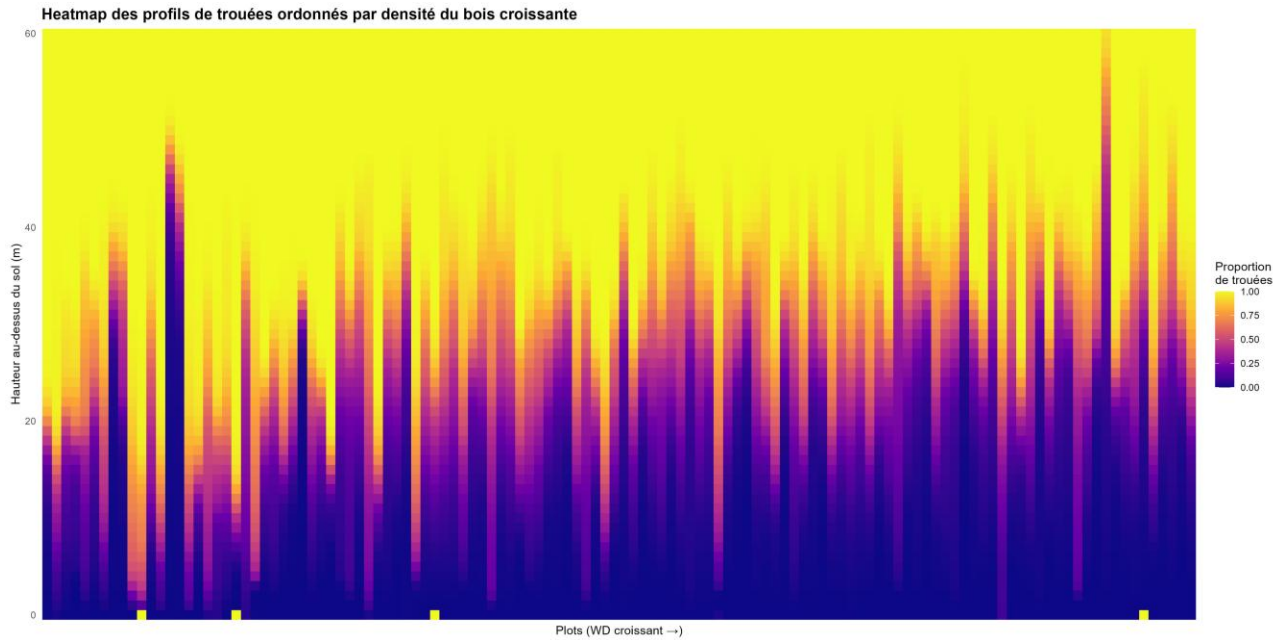


# ANALYSES DE BASE

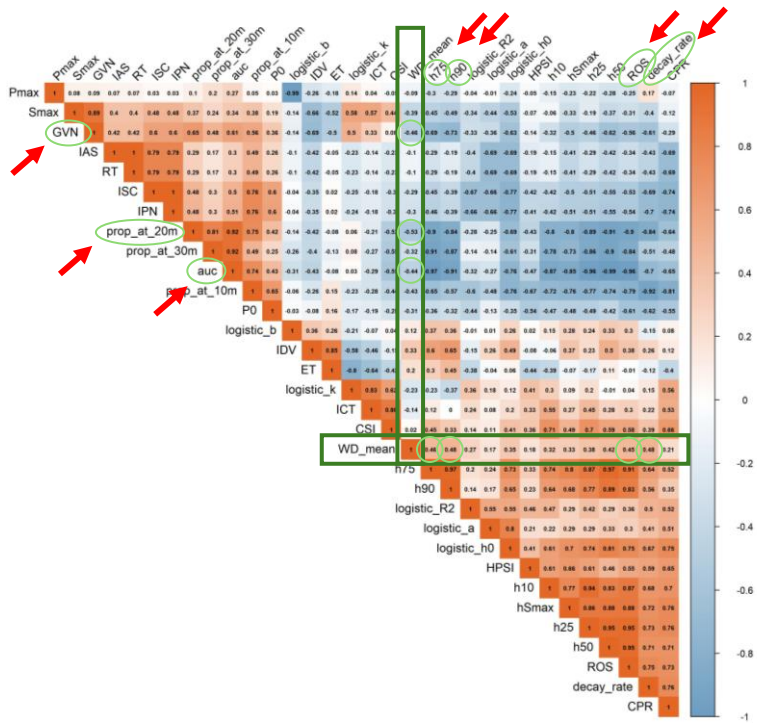
1



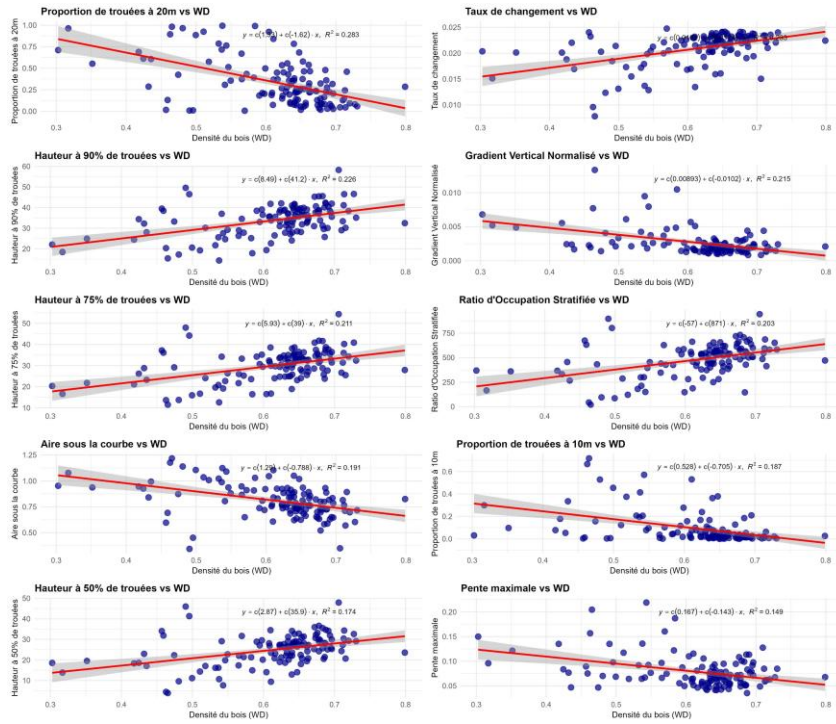
2



3

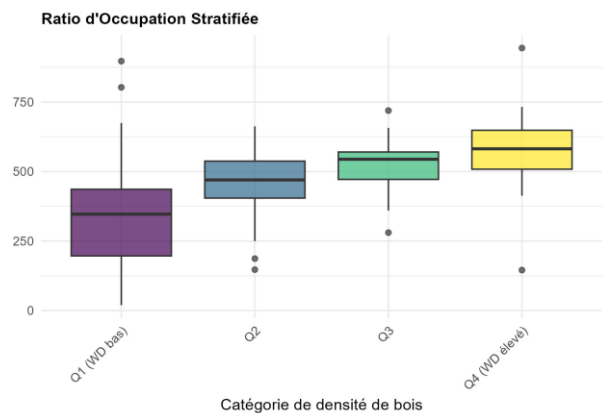
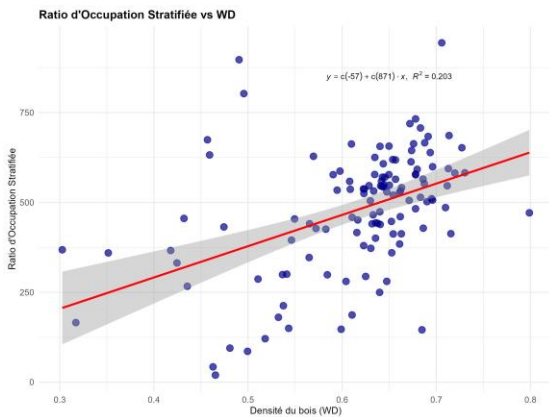


4



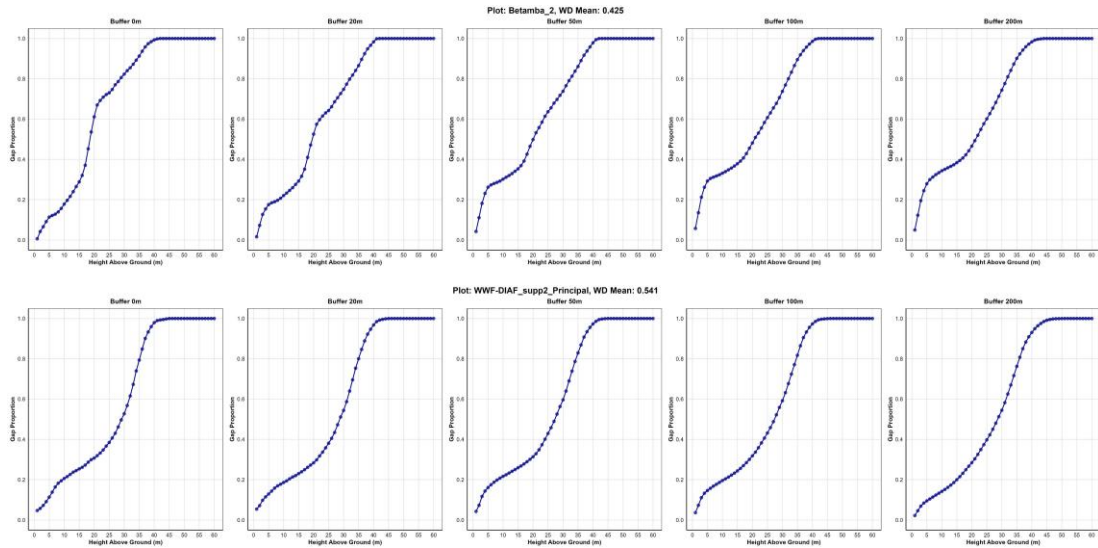
5

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



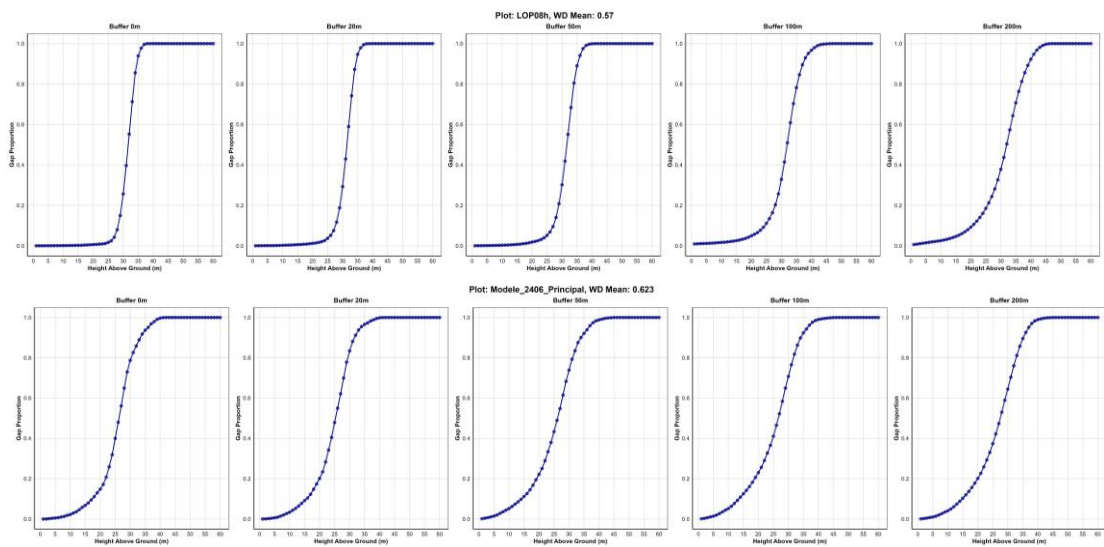
6

# Représentativité spatiale



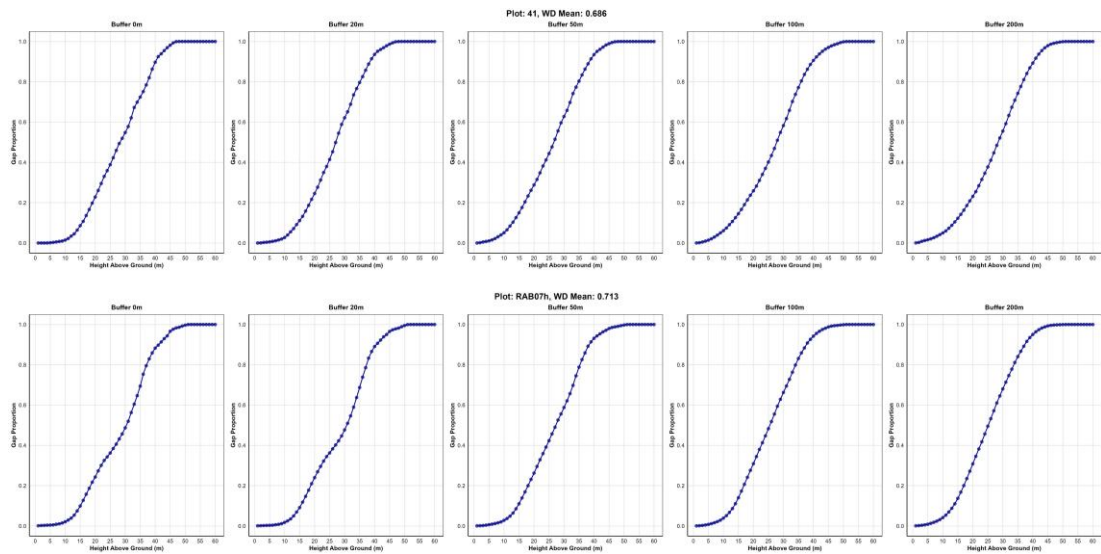
7

# Représentativité spatiale



8

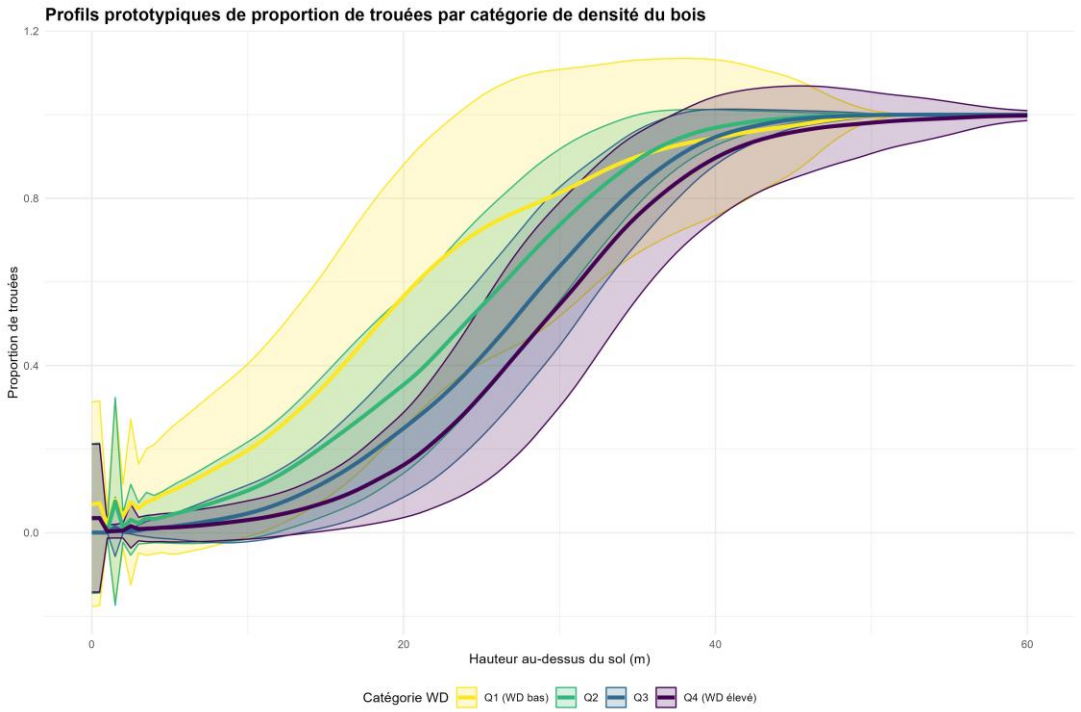
# Représentativité spatiale



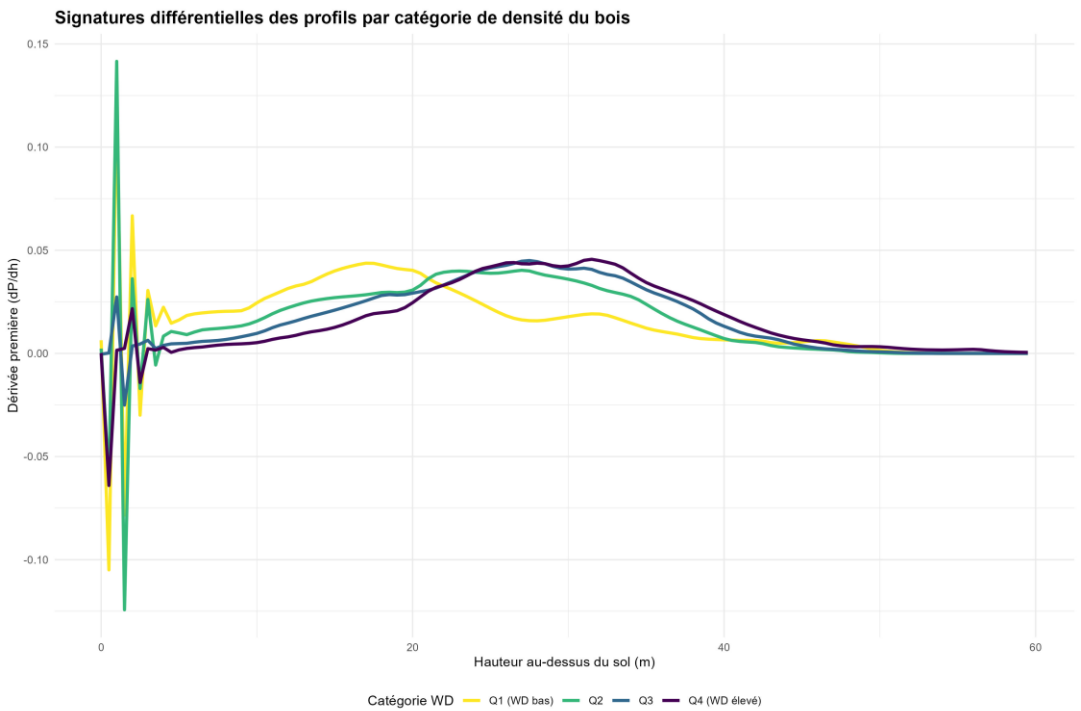
9

# ANALYSES APPROFONDIES

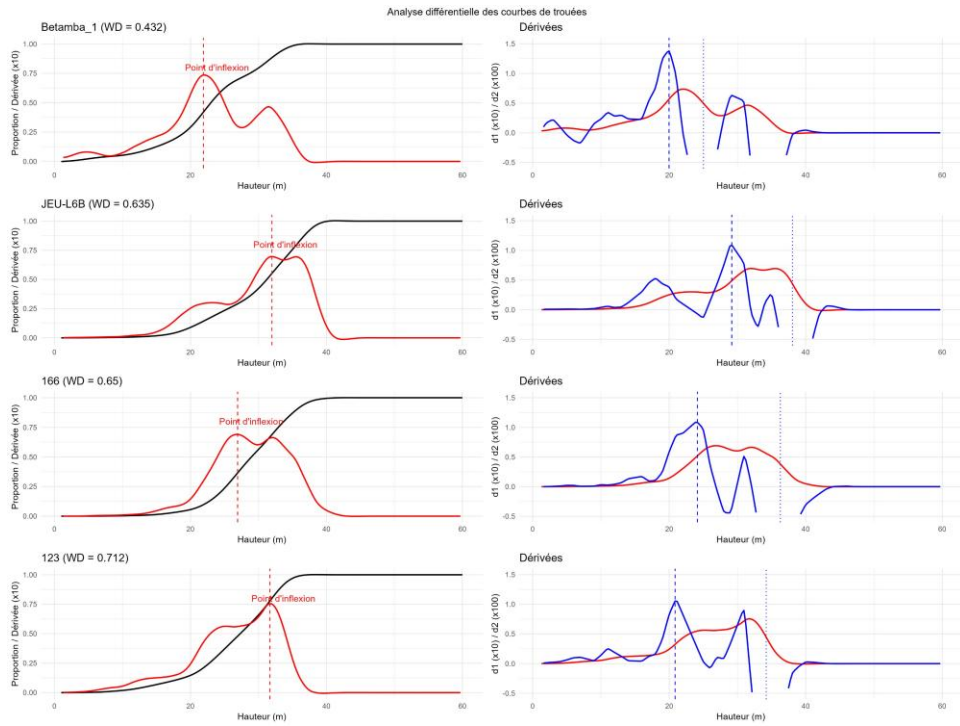
10



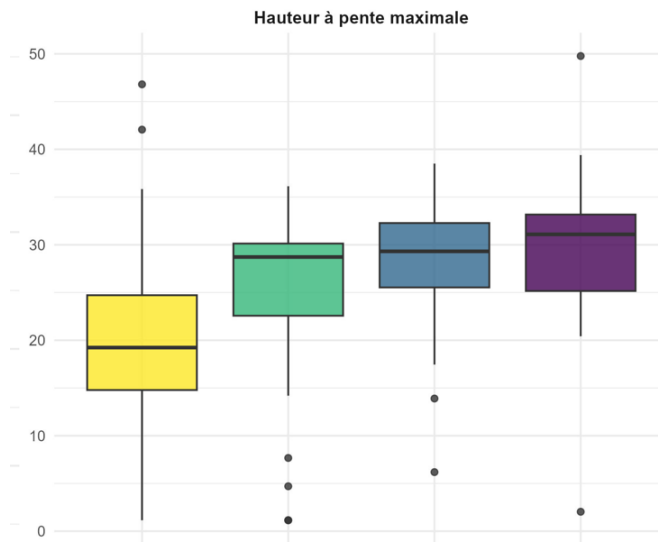
11



12

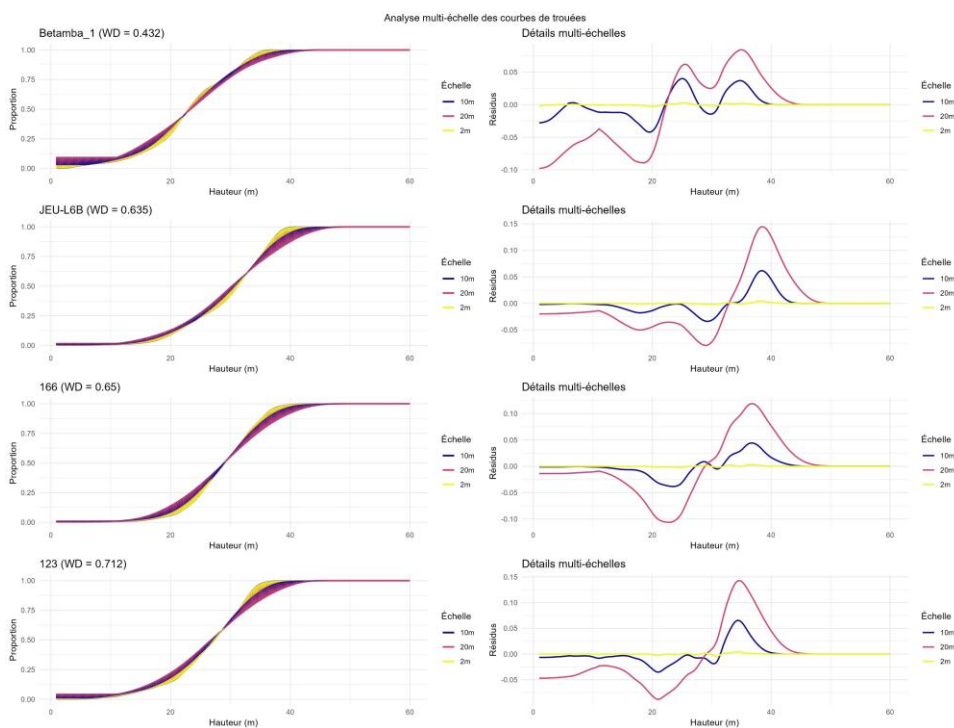


13

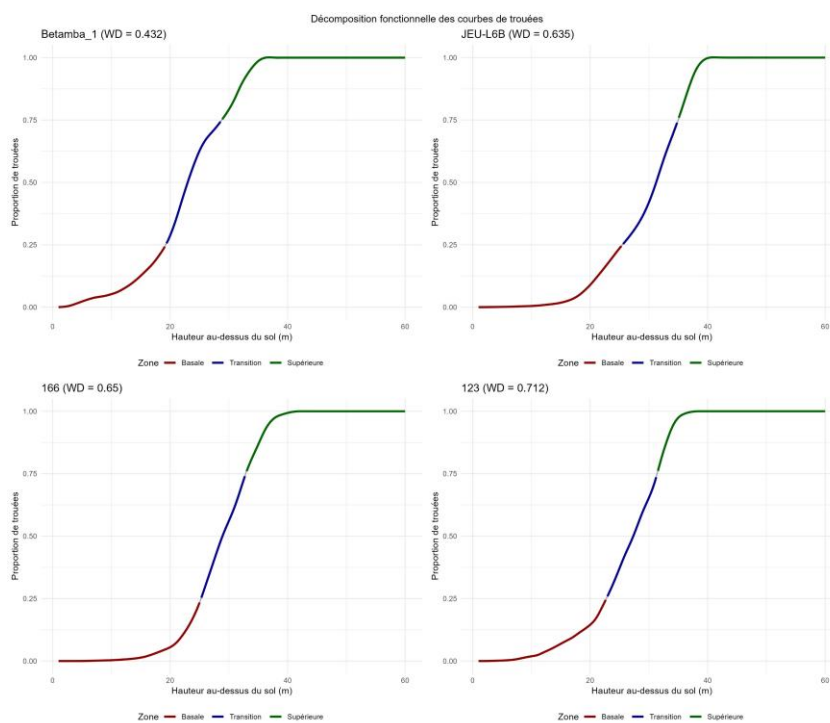


14



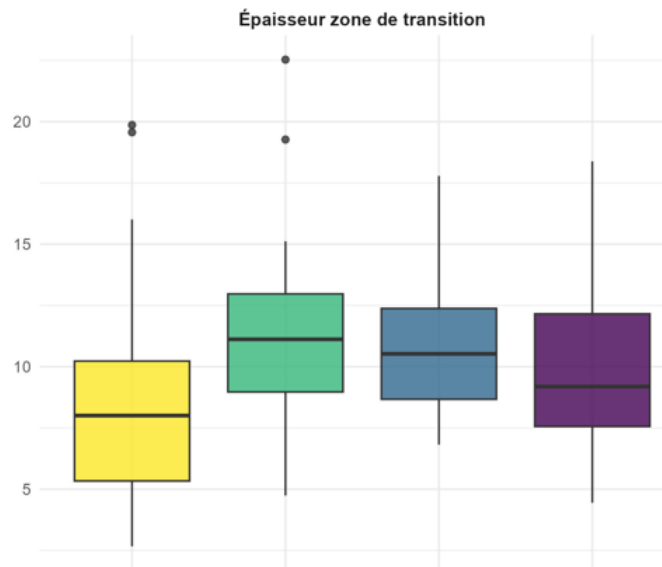


15

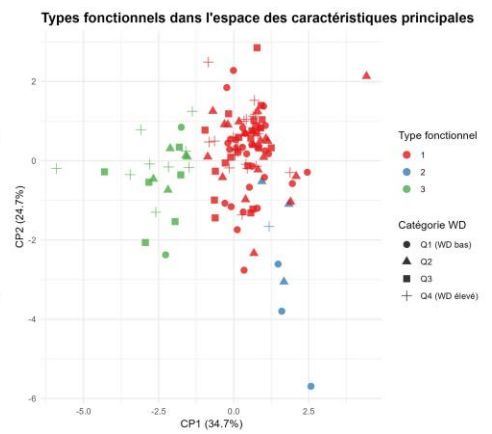
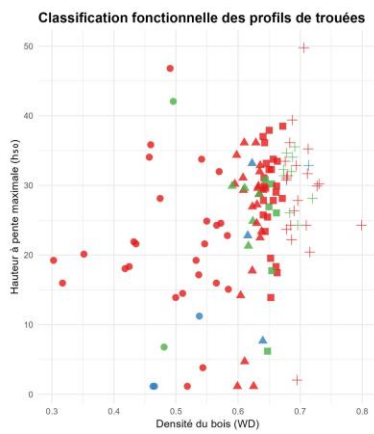
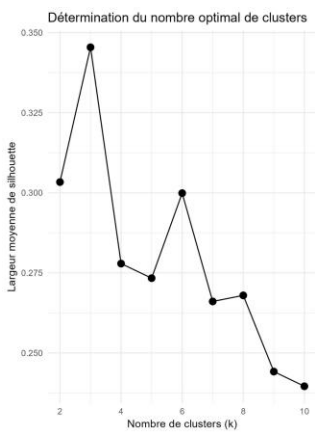


16

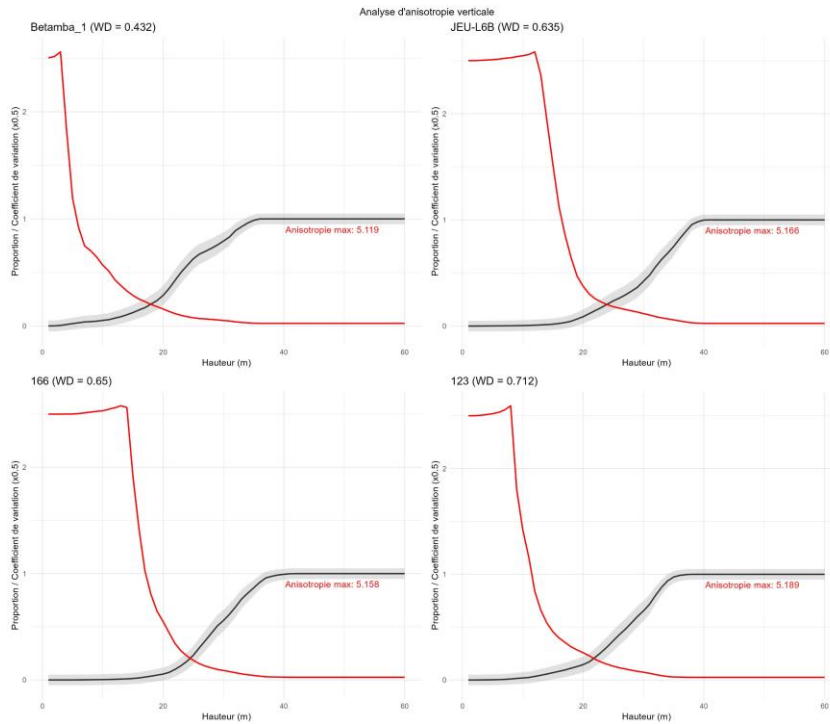




17



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'inflexion 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

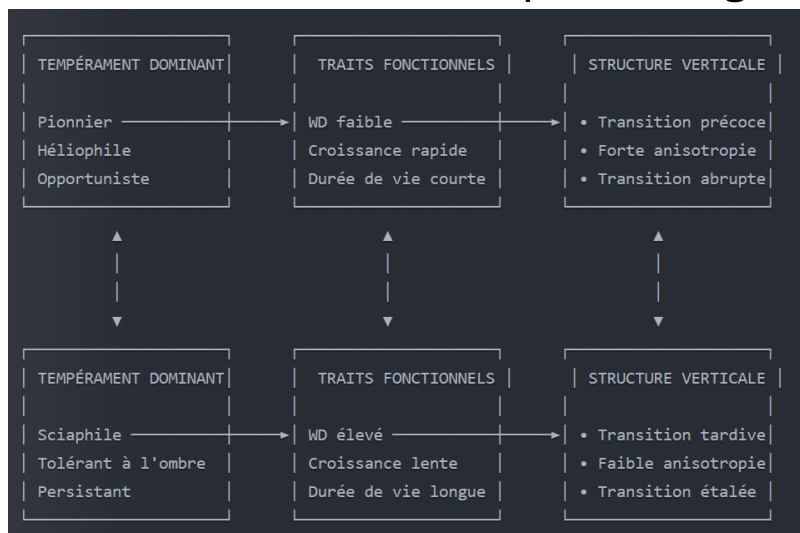
Nous avons développé une méthodologie novatrice qui décompose les profils de trouées forestières en plusieurs dimensions complémentaires :

- 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

## POUR LA SUITE



## 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 modulation (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
- 3Connexion 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 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 profils 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) corréleront avec la diversité taxonomique et fonctionnelle.

37

## Idée de discussion et perspectives

- Lien avec le microclimats 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